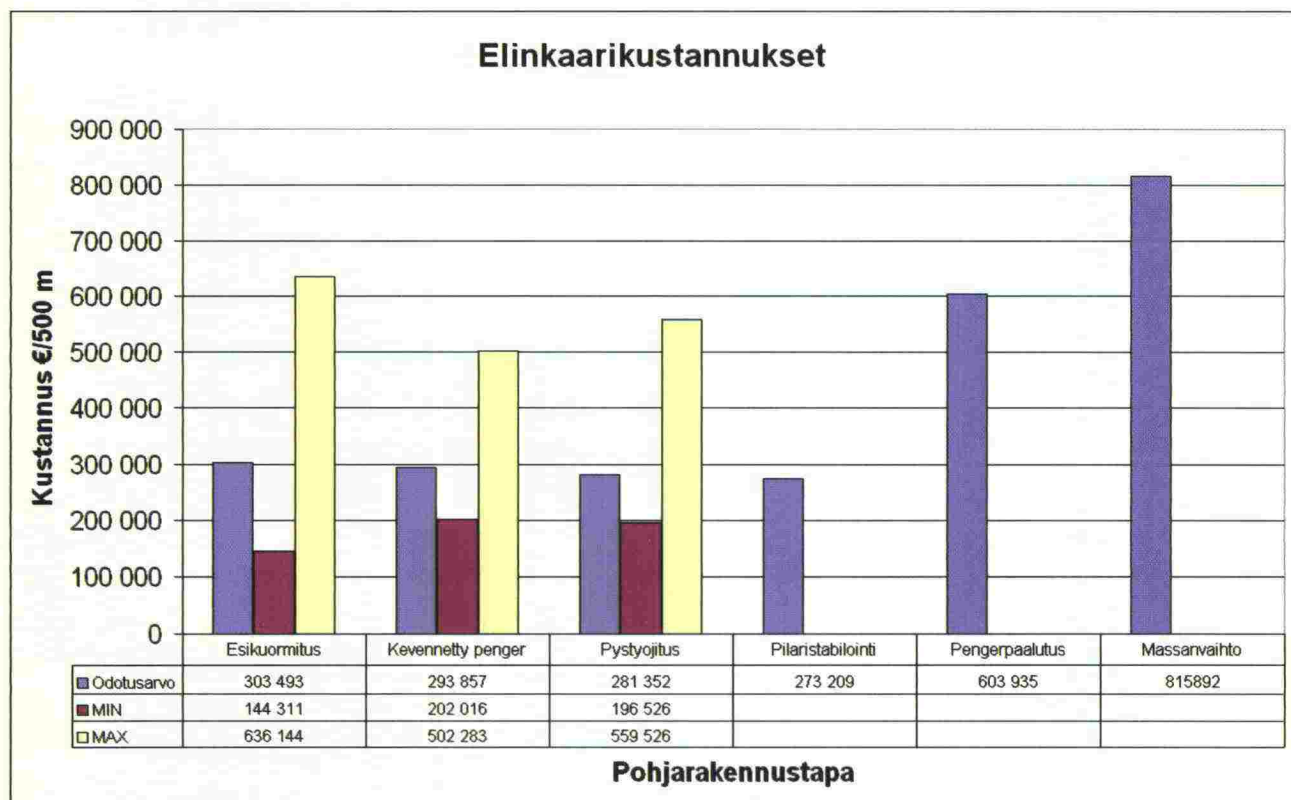


Perttu Juntunen

Elinkaarikustannukset ja painumariskit tien perustamistavan valinnassa

Tiehallinnon selvityksiä 20/2004



Perttu Juntunen

Elinkaarikustannukset ja painumariskit tien perustamistavan valinnassa

Tiehallinnon selvityksiä 20/2004

Tiehallinto

Helsinki 2004

ISSN 1457-9871
ISBN 951-803-251-3
TIEH 3200870

Oy Edita Prima Ab
Helsinki 2004

Verkkojulkaisu (pdf):
ISSN 1459-1553
ISBN 951-803-252-1
TIEH 3200870-v

Verkkojulkaisu saatavana osoitteesta:
www.tiehallinto.fi/julk2.htm



Tiehallinto
TEKNISET PALVELUT
Opastinsilta 12 A
PL 33
00521 HELSINKI
Puhelinvaihte 0204 2211

Perttu Juntunen: Elinkaarikustannukset ja painumariskit tien perustamistavan valinnassa. Helsinki 2004. Tiehallinto. Tiehallinnon selvityksiä 20/2004. 76 s.+ liitt. 11 s. ISSN 1457-9871, ISBN 951-803-251-3, TIEH 3200870.

Asiasanat: pohjanvahvistus, elinkaari, riskit, kustannukset, pohjarakentaminen, painumat, vakavuus, tiepenger
Aiheluokka: 02

TIIVISTELMÄ

Pohjanvahvistuskustannukset muodostavat yleensä suuren osan tien elinkaarikustannuksista. Tähän mennessä näitä kustannuksia ei ole kuitenkaan systemaattisesti otettu huomioon rakenneratkaisujen valinnassa. Tämän selvityksen tavoitteena oli tutkia kuinka pohjarakenteiden elinkaarikustannuslaskentaa voitaisiin kehittää, niin että tien elinkaarikustannukset sekä tien pitäjän että tien käyttäjän näkökulmasta optimoituisivat.

Selvityksen alkuosassa on esitetty kirjallisuuskatsaukseen perustuva yhteenveto tärkeimmistä tekijöistä, jotka vaikuttavat pohjarakenteiden elinkaarikustannuksiin ja niiden laskentaan. Tavoitteena oli selvittää elinkaarikustannuslaskennan lähtöolettamuksia ja elinkaarikustannuslaskentaan sisältyviä ongelmia. Lisäksi tässä kohtaa on esitetty pohjarakentamiseen liittyvät tärkeimmät riskitekijät sekä rakennuttajan vaikutuskeinot riskeihin eri urakamuodoissa.

Selvityksen loppuosassa käsitellään esimerkkikohteen pohjarakenteiden elinkaarikustannuslaskelmia. Esimerkissä tiepenger perustetaan pehmeälle savikolle. Laskelmat on tehty esikuormitetulle-, kevennetylle- ja pystyojitetulle penkereelle sekä penkereelle, joka on perustettu pilaristabiloinnin, massanvaihdon tai pengarpaalutuksen varaan. Elinkaarikustannuslaskenta on tehty mitoittamalla rakenteet ja korjaukset vallitsevien suunnitteluohjeiden mukaisesta ja laskemalla mitoitetuista ratkaisuista aiheutuvat tien pitäjän ja tien käyttäjän kustannukset.

Elinkaarikustannuslaskelmissa on otettu huomioon pohjarakenteiden valintaan sisältyvien riskien suuruus ja vaikutukset. Riskien suuruutta on arvioitu tienpenkereen painumaennusteisiin liittyvien todennäköisyyksien ja toteutuvista painumista aiheutuvien ylläpito-kustannusten perusteella. Selvityksessä on vertailtu vaihtoehtojen investointikustannuksia sekä eri päätöskriteerien mukaisia elinkaarikustannuksia. Päätöskriteereinä on käytetty odotusarvon mukaisia kustannuksia sekä elinkaarikustannuksia mitoitus- tai pahimman painumaennusteen mukaisessa tilanteessa. Esimerkkilaskelmien mukaan pelkkien investointilaskelmien huomioiminen pohjarakenteiden valintapäätöksissä ei optimoi koko elinkaaren kustannuksia. Eri pohjarakennevaihtoehtoihin sisältyvien riskien huomioiminen elinkaarikustannuslaskennassa tuo uutta informaatiota päätöstilanteeseen ja saattaa muuttaa valintapäätöksen.

Elinkaarikustannuslaskennan tuloksiin vaikuttavat suuresti erilaiset laskelmissa tehdyt olettamet. Jos laskennassa käytetyt olettamet poikkeavat toisistaan, eivät laskentatulokset ole keskenään vertailukelpoisia. Laskelmien saaminen keskenään vertailukelpoiksi on kuitenkin urakka- ja tarjoustoiminnan kehittämiseksi välttämätöntä. Tämä vaatii siis selkeiden laskentaohjeiden luomista osaksi tarjouslaskentaa ja tarjousten arviointia.

Perttu Juntunen: Lifecycle costs and ground settlement risks in the Selection of Founding method of the Road embankment. Helsinki 2004. Tiehallinto. Tiehallinnon selvityksiä 20/2004. 76 s.+ liitt. 11 s. ISSN 1457-9871, ISBN 951-803-251-3, TIEH 3200870.

Keywords: ground improvement, lifecycle, risks, costs, ground construction, settlements, stability, road embankment

Classification: 02

ABSTRACT

Groundimprovement costs make up a large portion of the total lifecycle costs of the entire road. Until this time these costs were not systematically taken into account when choosing the final groundimprovement method. The aim of this study was to find out how counting of the lifecycle costs of the different ground construction methods could be developed, so that the total lifecycle costs of the road would be minimized for both the road keeper as well as the road users.

At the beginning of this study there is a literary-based summary of the most important factors that affect both the life cycle costs and the counting of those costs for the chosen groundimprovement method. The aim was to introduce the techniques of the lifecycle counting as well as the problems and assumptions that are associated with these methods. These issues have to be addressed before lifecycle costs can be calculated. Also the most important risks with ground construction and the ways to deal with those risks in different contract forms are presented here.

The latter part of this study deals with the lifecycle calculations of the different ground improvement methods. Calculations were drawn up based on the ground conditions under the chosen soft clay area, on top of which the road embankment was to be founded. Ground improvement alternatives included preloading, lightweight filling materials, vertical drains, stabilization columns, soil replacement and embankment piling. Calculations were made by first engineering the structure according to the rules and regulations that are in use at the moment. The second phase was to calculate costs for the road keeper and the road user based on the engineered structure.

In the examples the ground settlement risks and the consequences of those risks were taken into account. The amounts of risks were estimated based on the probabilities of the different ground settlement forecasts and repair costs linked to those forecasts. In this study investment costs and the lifecycle costs based on different decision criterions were compared. These criterions included expected lifecycle costs, lifecycle costs of the most likely –and the biggest settlement forecasts. Calculations show that mere investment costs do not optimise the whole lifecycle costs. It is also shown that settlement risks should be taken into account when calculating lifecycle costs as this creates new dimensions to look at the situation. Consequently the final decision may change completely.

Many assumptions affect the results of the lifecycle cost calculations. Thus it is equally important to know the made assumptions, as it is to compare the final results. If the assumptions used in the calculations are not the same between different sets of calculations then these calculations are not comparable to each other. Thus clear instructions how to conduct lifecycle cost analysis is crucial, if lifecycle costs are to be used as a part of contract and tendering process.

ALKUSANAT

Tämä selvitys on tehty Tiehallinnon tilauksesta Tieliikelaitoksen konsultoinnin geosuunnitteluryhmässä Tieliikelaitoksen ja Tiehallinnon yhteisesti rahoittamana T&K projektina, jonka tavoitteena on elinkaarikustannuslaskennan kehittäminen osaksi pohjarakenteiden valintaa.

Selvityksen on laatinut Perttu Juntunen Tieliikelaitoksesta. Selvitystyöryhmässä ovat lisäksi olleet mukana Tieliikelaitoksesta Mikko Smura, Aarno Valkeisenmäki sekä Tiehallinnosta Pentti Salo.

Helsingissä, maaliskuussa 2004

Tiehallinto, Tekniset palvelut

Sisällysluettelo

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLILUETTELO

1	JOHDANTO	11
2	TIEN POHJARAKENTEIDEN ELINKAARIKUSTANNUKSET	13
2.1	Yleistä	13
2.2	Elinkaarikustannusten erottelu	13
2.3	Tienpitäjän kustannukset	14
2.3.1	Investointikustannukset	14
2.3.2	Kunnossapitokustannukset	15
2.3.3	Ylläpitokustannukset	15
2.4	Tien käyttäjän kustannukset	15
2.4.1	Matka-aikakustannus	15
2.4.2	Ajoneuvokustannukset	16
2.4.3	Onnettomuuskustannukset	16
3	ELINKAARIKUSTANNUSTEN LASKENTA	17
3.1	Yleistä	17
3.2	Elinkaarilaskenta nykyarvomenetelmällä	17
3.2.1	Laskentakaavat	17
3.2.2	Laskentakorko	18
3.2.3	Tarkastelujakson pituus	19
3.2.4	Rakenteen jäännösarvo	20
4	POHJARAKENTAMISEN RISKIT JA RAKENNUTTAJAN VAIKUTUSKEINOT ELINKAARIKUSTANNUKSIIN ERI URAKKAMUODOISSA	21
4.1	Yleistä riskeistä	21
4.2	Pohjarakenteiden riskit ja yleiset tekniset tuotevaatimukset	21
4.2.1	Vakavuus	21
4.2.2	Painuma	23
4.3	Riskien vähentäminen	25
4.4	Riskien vaikutus elinkaarikustannuksiin	26
4.5	Urakkamuotojen vaikutus elinkaarikustannuksiin	27
4.5.1	Jako eri urakkamuotoihin	27
4.5.2	T-urakka	28
4.5.3	ST-urakka (KVU)	29
4.5.4	Elinkaarisopimus	30

5	ELINKAARIKUSTANNUKSET ESIMERKKIKOHTEESSA	32
5.1	Lähtötilanne elinkaarikustannusten laskemiseksi	32
5.1.1	Esimerkkikohteen valinta	32
5.1.2	Pohjarakenteiden ja korjaustoimenpiteiden mitoittaminen	33
5.1.3	Painumien suuruudesta aiheutuva korjaus	34
5.1.4	Sivukaltevuuden muutoksista aiheutuva korjaus	34
5.1.5	Muut elinkaarikustannuslaskelmien lähtöoletukset	34
5.1.6	Tien pohjarakenteen valinta elinkaarikustannusten perusteella	37
5.2	Painumaennusteen epävarmuuden huomiointi elinkaarikustannusten laskennassa	38
5.3	Esimerkkilaskelmat	44
5.3.1	Yleistä esimerkkilaskelmista	44
5.3.2	Esikuormitettu penger	44
5.3.3	Kevennetty penger	51
5.3.4	Pystyojitettu penger	56
5.3.5	Pilaristabiloitu penger	60
5.3.6	Pengerpaalutuksen varaan rakennettu penger	62
5.3.7	Massanvaihdon varaan rakennettu penger	64
5.4	Yhteenveto pohjarakenteiden elinkaarikustannuksista	66
6	JOHTOPÄÄTÖKSET	72
7	KIRJALLISUUSLUETTELO	74
8	LIITTEET	76

Symboliluettelo

C_k	Diskonttaustekijä
i	Laskentakorko
K_k	Suoritteen q_k nykyarvo laskentahetkellä
q_k	Suoritteen arvo tarkasteluhetkellä
EKN	Elinkaarikustannusten nykyarvo
RN	Rakennuskustannusten nykyarvo
KP	Vuosittaisten kunnossapitokustannusten (huoltokustannusten) nykyarvo
YP	Ylläpitokustannusten (kunnossapitävän korjauksen kustannusten) nykyarvo
MN	Muutuskustannusten nykyarvo
UK	Uusimiskustannusten nykyarvo
EN	Käytön aikaisten energiakustannusten nykyarvo
JN	Suunnitteluajan lopussa olevan jäännösarvon nykyarvo
r_r	Reaalikorko
r_n	Nimelliskorkoa
r_i	Inflaatio
L_r	Rajapituus
L	Tarkasteltava pituus
S, S_1, S_2	Ennustetun tai mitatun painuman suuruus
S_{\max}	Suurin sallittu painuman raja-arvo
Δp_k	Pituuskaltevuuden muutos
SR	Mahdollisen painuman ja todennäköisimmän painuman suhde
CV	Mitatun suureen variaatiokerroin
s	Mitatun suureen keskihajonta
x	Mitatun suureen keskiarvo
C_c	Kokoonpuristuvuusindeksi normaalisti konsolidoituneella osalla
C_r	Kokoonpuristuvuusindeksi ylikonsolidoituneella osalla
C_v	Konsolidaatiokerroin kokoonpuristuvassa maakerroksessa
σ_p	Maakerroksessa vallitseva konsolidaatiojännitys
e_0	Alkuhuokosluku
σ'	Maakerroksen jännitys kuorman lisäämisen jälkeen
σ'_0	Maakerroksen jännitys ennen kuorman lisäämistä
h	Kokoonpuristuvan kerroksen paksuus
S_{c1}, S_{c2}	Painumaennusteet muutetuilla parametrien arvoilla
$sd(C_c)$	Kokoonpuristuvuusindeksin keskihajonta normaalisti konsolidoituneella osalla
ΔS_c	Kokoonpuristuvuusindeksin aiheuttama muutos painumaennusteeseen
$sd(S)$	Ennustetun painuman keskihajonta
ΔS_c	Kokoonpuristuvuusindeksin aiheuttama painuman muutos normaalisti konsolidoituneella osalla
ΔS_r	Kokoonpuristuvuusindeksin aiheuttama painuman muutos ylikonsolidoituneella osalla
ΔS_v	Konsolidaatiokertoimen aiheuttama painuman muutos tarkasteluhetkellä
ΔS_p	Esikonsolidaatiojännityksen aiheuttama painuman muutos
CV_s	Painuman variaatiokerroin
$E[NPV]$	elinkaarikustannusten odotusarvo
NPV_i	painumaennusteen i kustannusten nykyarvo
p_i	painumaennusteen i toteutumisen todennäköisyys

1 JOHDANTO

Vaikka ensimmäisiä kokeiluja elinkaarilaskelmien parissa on tehty jo 1960-luvulla, ei elinkaarilaskenta ole maa- ja vesirakentamisessa saanut Suomessa todellista jalansijaa kuin vasta 1990-luvulla, jolloin tierakentamisessa aloitettiin elinkaarilaskennan kehittäminen osana päälysrakenteiden kestävyys- ja taloudellisuuden tutkimista. Tuolloin aloitettu kehitystyö on jatkunut nykyhetkeen asti ja kehitystä on tapahtunut sekä ympäristökuormitusten elinkaarilaskennassa että elinkaaren kustannusten laskennassa.

Elinkaarikustannusten laskennan ongelmana oli alkuaikoina se, että rakenteen eliniän määrittämiseksi tarvittavat kestoikämallit eivät vielä olleet kehittyneet tarpeeksi pitkälle. Päälysrakenteen osalta ongelma kestoikämallien osalta on osin poistunut, aivan vastaavaa kehitystä ei kuitenkaan ole tapahtunut pohjarakenteiden osalta. Pohjarakenteiden osalta valinnassa on perinteisesti korostunut tekninen näkökulma, jolloin valinnassa on annettu painoa vain rakennuskustannuksille ja rakenteiden teknisten vaatimusten täyttymiselle.

Pohjarakentamisessa olosuhteet saattavatkin rajata teknisesti toimivien pohjarakennusratkaisujen määrää huomattavasti, jo ennen kuin minkäänlaisia kustannuslaskelmia on edes tarpeen laatia. Perinteisesti elinkaarikustannuksia ei yleensä ole totuttu laskemaan, vaan rakenteen myöhempää kunnostustarvetta, kunnostettavuutta, kunnostuskustannuksia ja kunnostustoista tienkäyttäjille aiheutuvia liikenteellistä haittaa on arvioitu likimääräisesti tai ei lainkaan.

Yhteiskunnassa on viime vuosina alettu yhä määrätietoisemmin pyrkiä ekologisesti kestävämpään rakentamiseen. Tavoitteen puitteissa on säädetty esimerkiksi uusi rakennuslaki, jonka keskeisenä tavoitteena on parantaa maankäytön ja rakentamisen edellytyksiä kestävästä kehityksestä edistävään, ympäristöhaittoja vähentävään ja luonnonvarojen säästävään suuntaan. Tämä on tuonut mukanaan tarpeen kehittää kustannusten- ja ympäristövaikutusten elinkaarilaskentaa niin, että tuotannon ja rakentamisen kaikki vaikutukset rakenteen elinkaaren alusta loppuun tulevat huomioon otetuksi. Rakennusalan visioissa onkin todettu, että kestävä kehitys nousee yhdeksi tärkeimmistä arvoista kehittyneissä teollisuusmaissa. Tavoitteena on, että ympäristö- ja elinkaariosaamisen nostaminen korkeammalle tasolle. Samaan aikaan TEKES'in teknologian esiselvityksessä on todettu, että infrastruktuuriala on kehittynyt heikosti verrattuna muihin teollisuuden aloihin. Yhdeksi ongelmaksi nähtiin, että rakentamisen pelisäännöt eivät tue elinkaarikustannusten huomioon ottamista.

Tiehallinto on aina osaltaan pyrkinyt kehittämään edellytyksiä Suomen infrastruktuurialan kehittämiseksi. Muun muassa tästä syystä on Tiehallinnossa tehty sisäistä hankintamenettelyjen kehittämistyötä, jossa elinkaarikustannusten laskennalle on annettu tärkeä rooli tulevaisuuden visioissa. Kehittämistyön tuloksena on laadittu hankintastrategia, jonka tavoitteena on löytää keinoja kehittää nykyisiä hankintamuotoja kuten ST-urakkaa paremmin elinkaariajattelua huomioon ottavaksi. Samalla on pyritty luomaan aivan uudenlaisia hankintamuotoja kuten elinkaarisopimus, jonka perusajatuksena on pidentää urakoitsijan vastuuta tekemästään työstä myös varsinaista takuuaikaa pidemmäksi ajaksi. Elinkaarisopimuksilla urakoitsija sitoutuu tierakenteen hoitovastuuseen 25-30 vuotta rakentamisen jälkeen.

Vaikka ympäristökuormitusten vähentäminen on nähty tärkeäksi, on hankintamenettelyjä ja elinkaaren kustannuslaskentaa pyritty kehittämään etenkin kokonaistaloudellisuutta silmällä pitäen. Tavoitteena on, että tien pito tehottomisi ja tieverkon ylläpidosta aiheutuvat kustannukset alenisivat. Tämä onkin tärkeää, koska tienpitoon kohdistettuja määrärahoja ei yhteiskunnassa juurikaan olla kasvattamassa, kun liikennemäärät sen sijaan ovat edelleen selvässä kasvussa.

Koska pohjarakenteet muodostavat suuren osan tierakenteen elinkaaren kustannuksista, on luonnollista että pohjarakenteiden elinkaarikustannuksia pyritään systemaattisesti pienentämään. Tämän työn yhtenä tavoitteena on koota yhteen nykyistä tietoa pohjarakenteiden elinkaarilaskennasta sekä esimerkkilaskelmien ja ajatusten avulla esittää kuinka pohjarakenteiden elinkaarikustannuksia voitaisiin paremmin arvioida. Samalla selvityksessä on pyritty tuomaan esiin ongelmia ja kehittämistarpeita, joita elinkaarilaskennassa itsessään esiintyy. Esimerkiksi erotuksena moneen muuhun suunnitteluun, joissa materiaalien ominaisparametrit tunnetaan melko tai erittäin hyvin, liittyy maaparametrien määrittämiseen pohjarakentamisessa aina jonkinasteista epävarmuutta. Tämän epävarmuuden aiheuttamien kustannusriskien ymmärtäminen ja huomioon ottaminen on pohjarakenteiden osalta tärkeää, mikäli elinkaarilaskentaa halutaan kehittää osaksi pohjarakenteiden valintamenettelyä. Tässä selvityksessä onkin pyritty löytämään keinoja, joilla pohjarakentamiseen liittyvät riskit voitaisiin huomioida paremmin elinkaaren kustannuslaskennassa. Selvityksessä on myös tarkasteltu millaisia ovat rakennuttajan vaikutuskeinot elinkaarikustannuksiin eri urakkamuodoissa ja miten niitä mahdollisesti voitaisiin kehittää.

2 TIEN POHJARAKENTEIDEN ELINKAARIKUSTANNUKSET

2.1 Yleistä

Tuotteen elinkaarella tarkoitetaan yleisesti tuotteen kaikkia vaiheita raaka-aineiden hankinnasta, rakentamisesta, käytöstä, kunnossapidosta, korjauksista sekä mahdollisesta kierrätyksestä aina purkamiseen tai jätteeksi päättymiseen asti. Ajatusta voidaan soveltaa periaatteessa mihin tahansa tuotteeseen tai tuoteosaan. [14]

Tämän selvityksen yhteydessä tarkastellaan elinkaarikustannuslaskennan soveltuvuutta ja soveltamista tien pohjarakenteiden elinkaaren hallinnan ja pohjarakennusmenetelmän valinnan kannalta. Erilaisia elinkaaren hallintaan keskittyviä malleja on kehitetty useita erilaisia. Monissa näissä malleista useissa keskitytään tarkastelemaan elinkaaren aikana tuotteesta aiheutuvia ympäristövaikutuksia. Tällöin elinkaarimenetelmästä käytetään yleisesti nimitystä elinkaariarviointi (LCA=Life Cycle Analysis). Elinkaarimallien yhteydessä voidaan puhua ympäristökuormitusten lisäksi myös tuotteen elinkaarikustannuksista, jolloin on kyse elinkaarikustannusarvioinneista (LCC=Life Cycle Cost). [2] Tämä teksti tavoitteena on selvittää etenkin jälkimmäiseen osan eli elinkaaren kustannusten laskentaa ja arviointia, minkä vuoksi pohjarakenteiden ympäristövaikutuksia on esitelty tässä hyvin suppeasti

Elinkaaren kustannuksilla tarkoitetaan kaikkia rakenteen elinkaaren vaiheiden aikana syntyviä kustannuksia riippumatta siitä kenelle kustannukset kohdistuvat. Elinkaarikustannusarvioiden käytöllä pohjarakenteiden valinnassa on tarkoitus siirtämään huomio pelkistä rakenteen investointikustannuksista myös muihin kustannuksiin. [15] Ero tavalliseen käytäntöön on merkittävä siinä mielessä, että ennen muille aiheutuvia kustannuksia ei ole juurikaan otettu kustannuslaskelmissa huomioon.

Elinkaarikustannusarviointien tavoitteena on löytää kaikki elinkaaren aikana syntyvät kustannukset eri vaihtoehtoissa ja järjestää vaihtoehdot näiden kustannusten avulla edullisuusjärjestykseen. Koska tavoitteena on laittaa vaihtoehdot keskinäiseen paremmuusjärjestykseen, eikä löytää absoluuttisia elinkaaren kustannuksia, on elinkaarikustannuslaskennassa otettu käyttöön laskentaa yksinkertaistava laskentamenettely, jonka mukaan eri vaihtoehdoille yhteiset kustannukset voidaan jättää laskelmista pois. [2,7,11] Laskentamenettely yksinkertaistaa elinkaarikustannuslaskelmia ja siten parantaa menetelmän käytännön soveltuvuutta huomattavasti.

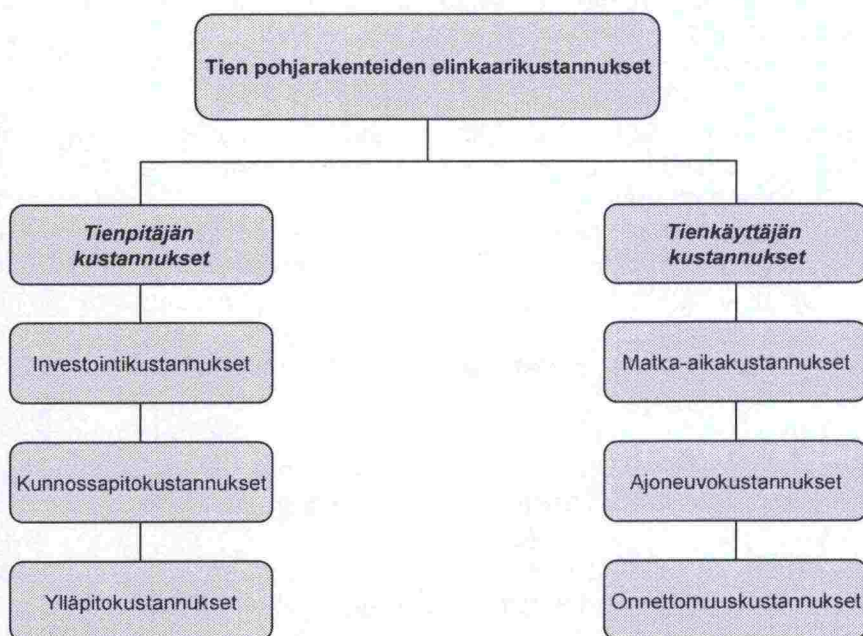
2.2 Elinkaarikustannusten erottelu

Tien pohjarakenteiden elinkaarikustannukset voidaan jakaa tien kahteen osaan, jotka ovat tienpitäjän kustannukset sekä tienkäyttäjän kustannukset. [7] Tienpitäjän kustannukset ovat kustannuksia, jotka kohdistuvat nimensä mukaisesti tienpitäjälle eli yleisen tie- ja katuverkon osalta valtiolle tai kunnalle. Tien pitäjän kannalta tiehankkeen käyttöiän kustannukset jakaantuvat kolmeen suureen kokonaisuuteen: investointi-, yllä- ja kunnossapito- sekä rahoituksen kustannuksiin [6].

Rahoituksen kustannukset tarkoittavat sidotun pääoman kustannuksia. [6] Rahoituksen kustannuksia kuten rakentamisen aikaisia korkoja ei tämän työn yhteydessä kuitenkaan käsitellä, sillä niiden suuruus riippuu muista teki-

jöistä kuin valittavista pohjarakenteista ja ne eivät varsinaisesti vaikuta ratkaisujen taloudellisuuteen.

Kuvassa 1 on esitetty tien pohjarakenteiden elinkaarikustannusten periaatteellinen jako tien pitäjän ja tien käyttäjän kustannuksiin. Kustannuksia on käsitelty tarkemmin omissa kappaleissaan.



Kuva 1. Tien pohjarakenteiden elinkaarikustannusten periaatteellinen jako.

2.3 Tienpitäjän kustannukset

2.3.1 Investointikustannukset

Kustannuslaskelmissa perusinvestointikustannuksilla eli hankintamenolla tarkoitetaan investoinnin alkuaikana uhrattavaa suurehkoa kertamenoa, joka varsinaisesti panee liikkeelle juoksevien kulujen virran [5]. Tien pohjarakenteiden osalta tämä tarkoittaa pohjarakenteiden rakentamisesta ja suunnittelusta aiheutuvia kustannuksia. Pohjarakenteiden kustannuksiin luettaisiin mukaan esimerkiksi penkereen massatöitten materiaali- ja työkustannukset lukuun ottamatta suodatin-, jakavan- sekä kantavan- ja kulutuskerroksen materiaali- työkustannuksia. Nämä kustannukset otetaan huomioon päällysrakenteen elinkaarilaskelmissa. [15,16] Raja pohja- ja päällysrakenteiden kustannusten ja etenkin niihin liittyvien kunnossa- ja ylläpitokustannusten osalta on parhaimmillaankin hieman epäselvä. Pohjarakenteiden valinnassa kustannusarvioihin otetaan lisäksi huomioon eri pohjarakennerekaisujen aiheuttamat erilaiset kustannukset, joita aiheutuu esimerkiksi vastapenger- tai ylipengermassatöiden sekä erilaisten tarkkailumittausten ja pohjatutkimusten seurauksena. [20]

2.3.2 Kunnossapitokustannukset

Tämän selvityksen yhteydessä kunnossapidolla tarkoitetaan tien liikennekel-
poisuuden varmistavia päivittäisiä hoitotoimenpiteitä. [7] Kunnossapitokus-
tannuksilla tarkoitetaan siten kustannuksia, jotka pitävät sisällään rutiinin-
omaisen kunnossapidon sekä talvihoidon kustannukset. [16] Muussa kirjalli-
suudessa kunnossapitokustannuksiin saatetaan sisällyttää kunnossapitävis-
tä korjauksista aiheutuvia kustannuksia. [14] Tässä tekstissä nämä kustan-
nukset sisältyvät kuitenkin ylläpitokustannuksiin. Rutiininomaista kunnossa-
pitoa ovat esimerkiksi vesakon raivaus ja muut vihertyöt sekä tiestön puh-
taanapito ja rakenteiden ja laitteiden hoito. Talvihoitoon puolestaan sisältyvät
esimerkiksi liukkauden torjunta ja lumenpoisto. [25] Nykyisellä kunnossapi-
don tasolla kunnossapidon kustannuksilla ei ole merkittävää eroa eri pohja-
rakenneratkaisujen välillä, joten niitä ei vertailulaskelmissa ole syytä ottaa
huomioon [16].

2.3.3 Ylläpitokustannukset

Ylläpitokustannuksilla tarkoitetaan kustannuksia, joilla ylläpidetään raken-
teen kuntoa valitun ylläpitostrategian mukaisesti. Ylläpitokustannuksiin vai-
kuttavat mm. haluttu ylläpitostandardi (toimenpideraja-arvot) sekä valitut yl-
läpitomenetelmät. Toimenpideraja-arvot vaihtelevat tien luokan mukaan.
Toimenpideraja-arvoja asetetaan esimerkiksi painumalle, tien tasaisuudelle,
urasyvyydelle, vauriosummalle ja kantavuussuhteelle. [15,16] Edellä mainitut
toimenpideraja-arvot koskevat lähinnä päällysrakenteita. Pohjarakenteiden
osalta vastaavanlaisena kuntomuuttujana tarkastellaan pohjamaan painumi-
sesta aiheutuvia sallittuja painuman ja kulmamuuutosten raja-arvoja. Laatuta-
soltaan erilaiset ratkaisut johtavat erilaiseen ylläpitotarpeeseen ja sitä kautta
erilaisiin ylläpitokustannuksiin, jotka pohjarakenneratkaisuja tehtäessä tulee
ottaa huomioon. Ylläpitotarvetta arvioidaan painumaennusteiden ja ennus-
teisiin liittyvän painumariskitarkastelun avulla. Tiehen tulevat epäjatkuvuus-
kohdat (sillat, putkijohdot) tulee ottaa huomioon ylläpitotarvetta lisäävänä
tekijänä. [19]

2.4 Tien käyttäjän kustannukset

2.4.1 Matka-aikakustannus

Tielläliikkujan matkustamiseen käyttämällä ajalla on aina jokin arvo ja siten
matkustamiseen kulutettu aika esittää kustannusta elinkaarilaskelmissa.
Matkustamiseen kulutettu aika taas riippuu pääosin reitin pituudesta ja ajo-
nopeudesta. Ajonopeuteen puolestaan vaikuttavat mm. tien geometria, pääl-
lysteen laatu ja -kunto, urasyvyys. [15,16] Tarkasteltaessa edellä mainittuja
tekijöitä voidaan todeta, että ne eivät yleensä vaihtelee valittavan pohjaraken-
neratkaisun perusteella, siten niitä ei tarvitse ottaa huomioon elinkaarilas-
kelmissa. Korkealuokkaisilla teillä ei myöskään epätasaisuuksien ja muiden
vaurioiden voida sallia kehittyvän niin haitallisiksi, että ne merkittävästi vai-
kuttaisivat tien käyttäjän kustannuksia. [16] Sen sijaan painumien korjaustöis-
tä aiheutuvat haitat lisäävät matka-aikakustannuksia liikenteen hidastuminen
ja mahdollisen ajomatkan piteneminen seurauksena. [23] Siten elinkaarilas-
kelmiin tulisi ottaa huomioon erilaisista pohjarakenneratkaisuista aiheutuvat
erilaiset korjaustarpeet sekä niistä tien käyttäjälle aiheutuvat matka-
aikakustannukset etenkin vilkasliikenteisten teiden osalta.

2.4.2 Ajoneuvokustannukset

Ajoneuvokustannukset ovat ajoneuvon hankinnasta ja ylläpidosta aiheutuvia kustannuksia, kuten polttoaine-, voiteluaine-, rengas-, korjaus-, hallinto- ja pääomakulut. [16,15,23] Pohjarakennusratkaisuilla ei voida pääteillä normaaliolosuhteissa vaikuttaa edellä esitettyihin kustannuksiin, joten ne jätetään tarkastelussa huomioon ottamatta. Sen sijaan ajoneuvokustannukset voidaan ottaa huomioon elinkaarilaskelmissa painumakorjausten yhteydessä samoin kuin on edellä esitetty matka-aikakustannusten osalta. Työmaiden seurauksena mm. polttoaineenkulutus sekä ajoneuvon kuluminen on suurempaa kuin moitteettomalla tieosuudella. [23]

2.4.3 Onnettomuuskustannukset

Onnettomuuskustannuksia on pyritty huomioimaan esimerkiksi tieluokan mukaisena keskimääräisenä onnettomuusriskinä sekä tietyömaiden aiheuttamana onnettomuusriskin kasvuna. Tosin onnettomuuskustannusten sekä onnettomuusriskin arvioinneissa esiintyy suurta epävarmuutta. [16,23] Tien urautumisen on havaittu lisäävän onnettomuusriskiä märissä olosuhteissa [15], samankaltaista vaikutusta ei ole kuitenkaan havaittu tien painumatasaisuuden vaihtelujen osalta, kun vaihtelut ovat pysyneet sallituissa rajoissa. [19] Sallituilla rajoilla tarkoitetaan tässä tilanteessa tien pohjarakenteiden suunnitteluperusteiden mukaisia sallittuja painuman ja kaltevuuden raja-arvoja. Pohjarakenteiden elinkaarilaskelmissa voidaankin onnettomuuskustannukset jättää tarkastelujen ulkopuolelle, jos ajatellaan, että tierakenteseen tehtävät korjaukset suoritetaan viimeistään siinä vaiheessa kun ne alkavat lisätä onnettomuusriskiä. Näin käytännössä tapahtuukin.

3 ELINKAARIKUSTANNUSTEN LASKENTA

3.1 Yleistä

Elinkaarikustannusten laskentamenetelmät perustuvat suurelta osin investointilaskennasta lähtöisin oleviin laskentamenetelmiin ja vertailuihin. Peruslähtökohtana ja keskeisenä ongelmana elinkaarilaskelmissa on eri maksusuoritusten tai laskettujen rahallisten hyötyjen ja menojen muuntaminen vertailukelpoisiksi. Elinkaarilaskelmat lähtevät olettamasta, että rahan arvo vaihtelee eri ajanhetkinä. Mitä kauempana tulevaisuudessa maksusuoritukset ovat, sitä pienempiä ovat niiden arvo nykyhetkellä. Tästä johtuen vertailulaskelmissa on aina mainittava millä ajanhetkellä kustannukset on laskettu. Suoritusten yhdenvertaiseksi muuttamista kutsutaan diskonttaamiseksi. [5,15] Koska rahan nimellisarvo muuttuu inflaation tai deflaation mukana, tulisi elinkaaren kustannukset tarkoissa laskelmissa ensin muuttaa reaaliarvoonsa esimerkiksi hintaindeksin avulla ja vasta sen jälkeen diskontata ne haluttuun tarkasteluhetkeen. Usein inflaatio jätetään laskelmista pois inflaatiokehityksessä esiintyvien epävarmuuksien takia, tällöin tulevaisuuden menot ja tulot ilmoitetaan suoraan tietyn ajanhetken reaaliarvoina ja diskonttaus suoritetaan reaalikoron avulla, joka nimelliskoron ja inflaation erotus [11,14,15] Tässä raportissa inflaatio otetaan huomioon juuri edellä esitetyllä tavalla.

Erilaisia elinkaaren kustannusten laskentamenetelmiä ovat esimerkiksi takaisinmaksuaikamenetelmä, nykyarvomenetelmä, vuosikustannusmenetelmä, kustannus-hyötysuhde menetelmä sekä sisäisen korkokannan menetelmä. Näistä yleisimmin käytetty menetelmä on nykyarvomenetelmä. Vuosikustannusmenetelmää käytetään, kun halutaan muuttaa yhdenvertaiksi eripituisia tarkasteluajanjaksoja. [16] Vuosikustannusmenetelmä on itse asiassa nykyarvomenetelmän laajennus, sillä ensin kustannukset muutetaan edellä mainitussa menetelmässä nykyarvoonsa kuten nykyarvo menetelmässäkin. Kustannusten nykyarvo muutetaan sitten vuotuisiksi kustannuksiksi ns. vuosikustannuskertoimen avulla. Tämän selvityksen yhteydessä tarkasteluajanjakso pidetään kaikissa vaihtoehdoissa samana, joten nykyarvo menetelmä antaa suoraan vertailukelpoiset laskentatulokset.

3.2 Elinkaarilaskenta nykyarvomenetelmällä.

3.2.1 Laskentakaavat

Nykyarvomenetelmän perusajatuksena on se, että eriaikaiset suoritukset diskontataan valittuun vertailuajankohtaan, joka tavallisesti on nykyhetki. Yleensä tehdään se yksinkertaistus, että suoritusten perusinvestointia lukuun ottamatta oletetaan tapahtuvan kunkin vuoden lopussa, tällöin suorituksen nykyarvo saadaan kertomalla kustannus diskonttaustekijällä. [5] Diskonttaustekijän lasketaan kaavalla 1.

$$c_k = \frac{1}{(1+i)^n} \quad (1)$$

missä

c_k = diskonttaustekijä vuonna n

i = laskentakorkokanta, esimerkiksi 4-6 %, jolloin i=0,04-0,06

n = aika vuosina laskentahetkestä

Yksittäisen suoritteen nykyarvo laskentahetkellä saadaan kaavasta 2.[5]

$$K_k = q_k \cdot c_k \quad (2)$$

missä

K_k = vuodelle k kohdistuvan suoritteen q_k nykyarvo laskentahetkellä

c_k = diskonttaustekijä

Tietylle vuodelle kohdistuva suorite on yleensä kyseisenä vuonna tehdyn korjauksen arvo tai rakenteen jäännösarvo tarkastelujakson lopussa. Pohjarakenteiden osalta elinkaaren kaikkien kustannusten nykyarvoa voidaan arvioida kaavalla 3.

$$EKN = IK + KP + YP + TK - JN \quad (3)$$

missä

EKN = elinkaarikustannusten nykyarvo

IK = investointikustannusten nykyarvo

KP = vuosittaisten kunnossapitokustannusten (hoitokustannukset) nykyarvo

YP = ylläpitokustannusten (rakenteen ylläpitokorjaukset) nykyarvo

TK = tienkäyttäjän kustannusten nykyarvo

JN = suunnitteluajan lopussa olevan jäännösarvon nykyarvo

3.2.2 Laskentakorko

Koska laskentakorolla on huomattava vaikutus elinkaarilaskelmien tuloksiin, on syytä hieman tarkastella sen valintaa. Elinkaarilaskennassa laskentakoron keskeiseksi tehtäväksi voidaan katsoa eriaikaisia suorituksia sisältävien investointien saattamisen keskenään vertailukelpoisiksi. Toisaalta laskentakorko ilmaisee investoinnin sisäisen tuottovaatimuksen. [5,7] Laskentakorkona käytetään tämän julkaisun yhteydessä reaalikorkoa, joka lasketaan nimelliskorkokannan ja inflaation erotuksena kaavan 4 mukaisesti. [14]

$$r_r = r_n - r_i \quad (5)$$

missä

r_r = reaalikorko

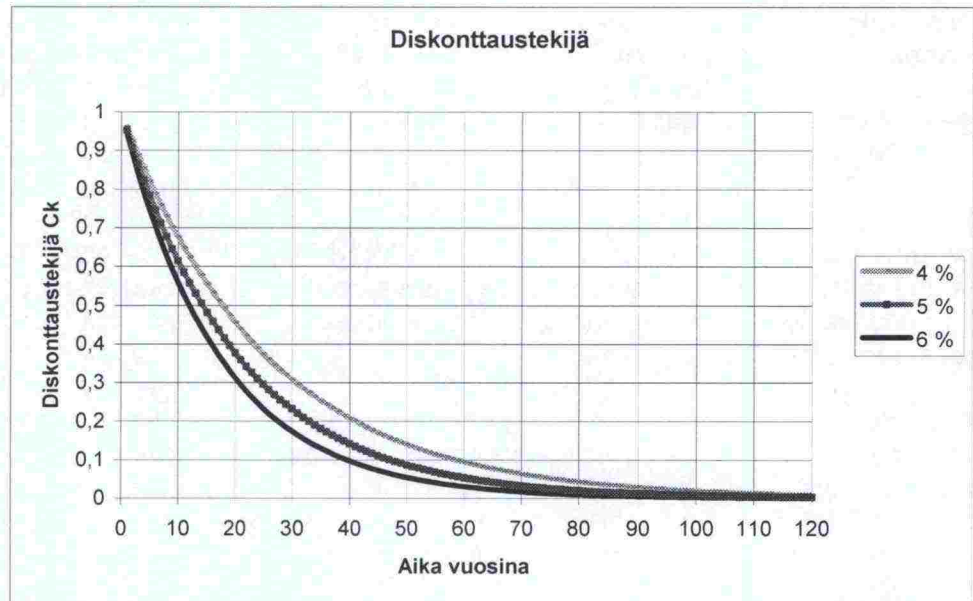
r_n = nimelliskorkoa

r_i = inflaatio

Arvio laskentakoron suuruudesta vaihtelee sen mukaan, millaista tuottoa investoinnilta edellytetään. Yksityisellä sektorilla laskentakorko on yleensä suurempi kuin julkisen sektorin hankkeissa, sillä julkisissa hankkeissa on tuottovaatimuksen lisäksi myös muita esimerkiksi poliittisia tavoitteita.

Ohjeellisena raja-arvona voidaan todeta, että laskentakoron ei tulisi olla pienempi kuin se korko, jolla investointiin vaadittavat pääomat on saatu lainattua pääomamarkkinoilta. Lisäksi tulisi pitää mielessä, että laskentakoron valinta on osittain subjektiivista ja riippuu tuotto-odotusten lisäksi myös siitä kuinka tulevaisuuden tuloja ja menoja arvostetaan. Mitä suurempaa laskentakorkoa käytetään sitä suuremman painoarvon alkuinvestointi saa ja sitä vähemmän merkitystä annetaan tulevaisuudessa syntyville kustannuksille. [15]

Liian suureksi valittu korkokanta johtaakin siis yleensä halvimman pohjarakennusratkaisun valintaan. Julkisissa hankkeissa käytetyt korkokannat ovat USA:ssa, Ruotsissa, Suomessa ja Isossa-Britanniassa vaihdelleet välillä 4-6 %. [7] Reaalikorko on pitkällä aikavälillä ollut teollisuusmaissa yleensä 2-5 %, mikä vastaa hyvin edellä esitettyä korkotasoa. [11] Laskentakoron merkitystä kustannusten nykyarvon laskennassa valaisee kuva 2, jossa on esitetty laskentakoron ja diskonttaustekijän välinen yhteys. Nähdään selvästi kuinka laskentakoron nostaminen tai ajan lisääminen pienentää selvästi kustannusten nykyarvoa.



Kuva 2. Diskonttaustekijä tarkastelujakson pituuden ja laskentakoron

3.2.3 Tarkastelujakson pituus

Elinkaarilaskelmat kohdistuvat ennalta valitulle ajanjaksolle, jonka pituus riippuu ratkaisevasti tarkasteltavasta kohteesta ja sen teknisestä ja taloudellisesta käyttöiästä. Pohjarakenteiden osalta rakenteen teknisellä käyttöiällä tarkoitetaan aikaa, jona rakenne täyttää sille asetetut vaatimukset käyttö- ja murtorajatiloiissa. Käyttöiän aikana rakennetta ylläpidetään, mutta sille ei tarvitse tehdä suunnittelussa määrittelemättömiä korjaustoimenpiteitä. Tien pohjarakenteiden osalta tekninen käyttöikä on 100 vuotta, päällysrakenteiden osalta 30 vuotta. [18] Toisaalta tarkastelujakson ja käytetyn laskentakorkokannan tulee olla oikeassa suhteessa toisiinsa. Suuri laskentakorko merkitsee sitä, ettei kaukana tulevaisuudessa tapahtuville kustannuserille anneta riittävää merkitystä. Toisaalta mitä kauemmas tulevaisuuteen ennusteita tehdään, sitä suurempi on riski, että arvioinneissa esiintyy virheitä. [7] Liian lyhyt tarkastelujakso lisää puolestaan rakenteen jäännösarvon merkitystä laskelmissa ja lisää tätä kautta laskelmien epävarmuutta. Tämän vuoksi tarkastelujakso tulisi valita niin pitkäksi, ettei rakennevaihtoehtojen jäännösarvojen eroilla tule olemaan ratkaisevaa merkitystä laskennan kannalta. [16] Sadan vuoden laskentajakso on yleensä tarkasteluihin liian pitkä. Toisaalta on arvioitu, että pohjarakenteiden osalta toiminnallinen ikä vaihtelisi välillä 20-80 vuotta. [16] Näiden syiden perusteella on tässä selvityksessä tarkastelujakson pituutena käytetty 50 vuoden ajanjaksoa.

3.2.4 Rakenteen jäännösarvo

Rakenteen jäännösarvolla tarkoitetaan yleisesti sitä arvoa, mikä rakenteella on tarkastelujakson lopussa. Jäännösarvon määrittämisen vaikeuden vuoksi jäännösarvo pyritään monesti jättämään laskelmista pois olettamalla se nol-laksi. Toisaalta jäännösarvoa voidaan käsitellä kustannuksena, joka tarvi-taan rakenteen palauttamiseksi alkuperäiseen tilaan tai rakenteen purkami-sesta aiheutuvia kustannuksia. Tällöin rakenteen jäännösarvo voi olla jopa negatiivinen. [5,7,16]

Tien pohjarakenteiden osalta rakenteen jäännösarvon määrittäminen on erit-täin hankalaa yleisellä tasolla, sillä rakenteen käyttökelpoisuus tarkastelu-jakson lopussa voi vaihdella huomattavasti. Esimerkiksi pengerpaalutuksella voi olla melko suurikin jäännösarvo tarkastelujakson lyhyen tarkastelujakson päättyessä, jos tien sijainti ja toiminta eivät tällöin muutu ja teräsbetoniraken-teilla on vielä teknistä käyttöikää jäljellä. Toisaalta pengerkorkeuden nosta-minen tai tien linjauksen muuttaminen saattavat johtaa siihen, että paalura-kennetta ei voida käyttää juurikaan hyväksi. Tällöin rakenteen jäännösarvo on hyvin pieni tai olematon verrattuna edelliseen tapaukseen. Pohjaraken-teiden jäännösarvo voidaankin luotettavasti arvioida vasta taloudellisen pito-ajan lopulla, kun tiedetään vanhaan tierakenteeseen kohdistuvat tulevat kor-jaus tms. toimenpiteet.

Rakenteen jäännösarvon merkitystä mietittäessä tulee pitää mielessä myös sen laskennallinen merkitys kustannusten nykyarvoa laskettaessa. Koska rakenteen jäännösarvo määritetään tarkastelujakson lopussa, on jäännösar-von merkitys sitä pienempi mitä pidemmästä tarkastelujaksosta on kyse. Seuraava esimerkki valottaa tilannetta. Jos pohjarakenteiden osalta esimer-kiksi valitaan tarkastelujaksoksi edellä esitetty 50 vuotta laskentakorolla 4 %, jota voidaan pitää järkevänä laskentakoron miniminä, saadaan diskonttaus-tekijän arvoksi $ck = 1/(1+0,04)^{50} = 0,146$. Jos siis oletetaan, että rakenne ei ole menettänyt elinkaarensa aikana arvostaan yhtään eli jäännösarvo on täydet 100 % rakennuskustannuksista, sen vaikutus olisi tällöin 14,6 % ra-kennuskustannusten nykyarvosta. Vastaavasti rakenteen jäännösarvon ol-lessa puolet eli 50 % rakennuskustannuksista olisi vaikutus 7,3 % rakennus-kustannusten nykyarvosta. Esimerkistä nähdään, että kun tarkastelujakson pituuden ollessa niinkin pitkä kuin 50 vuotta ei rakenteen jäännösarvon tark-ka määrittäminen olekaan aivan välttämätöntä, koska arvioinneissa tehdyn virheen suuruus jää diskonttaamisen jälkeen kuitenkin suhteellisen pieneksi. Suuremmilla laskentakoroilla jäännösarvon vaikutus pienenee vielä huomat-tavasti edellisestä esimerkistä. Rakenteen jäännösarvon nykyarvon kehitty-minen laskentakoron ja tarkastelujakson pituuden funktiona käy suoraan ilmi kuvasta 2.

4 POHJARAKENTAMISEN RISKIT JA RAKENNUTTAJAN VAIKUTUSKEINOT ELINKAARIKUSTANNUKSIIN ERI URAKKAMUODOISSA

4.1 Yleistä riskeistä

Riski määritellään eri tilanteissa hieman eri tavalla. Yleensä riski käsitetään pelkästään tappion mahdollisuudeksi tai -vaaraksi ja sillä negatiivinen arvotulos. Tällöin puhutaan yleensä puhtaasta riskistä, koska tällaisessa ajatusmallissa tilanteissa on vain kaksi mahdollisuutta, joko tappiota syntyy tai sitä ei synny. Toisaalta voidaan puhua myös spekulatiivisesta riskistä, joka sisältää tappion mahdollisuuden lisäksi myös voiton mahdollisuuden. Laajasti ajateltuna riskiä voidaan pitää mahdollisuutena, että asetetut tavoitteet eivät toteudu. [4, 10] Tämän määritelmän laajentaa riskikäsitteen myös tilanteisiin, joissa taloudellisia vaikutuksia on vaikea tai jopa mahdotonta mitata. Sekä taloudellisella riskillä että riskillä laajemminkin on paikkansa pyrittäessä ymmärtämään mitä pohjarakentamisen riskeillä tarkoitetaan.

Riskin käsitteen tulisi ottaa huomioon sekä riskiksi katsotun tapahtuman todennäköisyys että sen seuraukset. Tällöin riskiä voidaan pitää riskitapahtuman todennäköisyyden ja sen toteutumisen aiheuttamien seurauksien funktiona. Näin määriteltynä riskiä voidaan arvioida todennäköisyyslaskennalla ja riskille voidaan antaa laskennallisia arvoja. [10] Useimmiten tapahtumien todennäköisyyksiä mitataan tilastollisten menetelmien avulla puhtaasti matemaattisesti. Kun näitä vaihtoehtoja ei ole käytettävissä tai niiden käyttäminen osoittautuu vaikeaksi, voidaan todennäköisyyttä arvioida subjektiivisesti, jolloin arvion todenperäisyys riippuu lähinnä lausunnonantajan pätevyydestä. Viimeksi mainittu vaihtoehto on useimmiten käytetty menetelmä pohjarakenteiden valinnassa ja suunnittelussa.

Teiden pohjarakentamisessa geoteknisen suunnittelun problematiikka voidaan jakaa kolmeen osakenttään, jotka liittyvät vakavuus-, kantavuus- sekä muodonmuutos- ja sivusiirtymätilanteiden hallintaan. [3] Käytännössä tiepenkereen perustamistavan valinnassa korostuvat kaksi ensin mainittua perusvaatimusta jotka ovat riittävä varmuus tiepenkereen sortumaa ja heikosta vakavuudesta aiheutuvia siirtymiä vastaan ja lisäksi painumien on pysyttävä sallituissa rajoissa. [18] Teiden pohjarakentamisen riskit liittyvät siten kahden edellä mainitun ongelman ratkaisujen onnistumisvarmuuteen sekä ratkaisujen epäonnistuessa niistä aiheutuviin seurauksiin. Vakavuudelle ja painumalle asetettuja tavoitteita on tarkasteltu seuraavissa kappaleissa.

4.2 Pohjarakenteiden riskit ja yleiset tekniset tuotevaatimukset

4.2.1 Vakavuus

Penkereissä, leikkauksissa ja kaivannoissa aiheutuu maamassojen omasta painosta sekä muista kuormista maaperään leikkausjännityksiä, jotka eivät saa ylittää maan murtokuormaa, koska tämä aiheuttaisi maarakenteen sortumisen. Arvioitaessa luiskien maarakenteiden sortumisriskiä merkitsee sitä, että ns. vaarallisimmalla liukupinnalla vaikuttavan maan tai kallion leikkauslujuuden ja leikkausjännityksen suhde eli varmuusluvun F tulee olla riittävän suuri. Teoriassa luiska on vakaa, jos varmuuskerroin on yli yksi, mutta eri

epävarmuustekijöiden vuoksi vaaditaan rakenteelta suurempaa varmuutta. Epävarmuustekijöitä ovat esimerkiksi:

- ominaisparametrien määrittäminen
- rakenteen todellisten kuormien määrittäminen
- rakennustoleranssit
- laskentamallien sisältämät olettamet.

Luiskan varmuutta voidaan tarkastella kahdella tavalla. Edellä esitetty tapa perustuu kokonaisjännityksiin ja kokonaisvarmuuslukuun. Toinen tapa on se, että kuormat ja lujuusparametrit muutetaan laskentaparametreiksi osavarmuusluvuilla, jolloin on kyseessä osavarmuuskerroinmenetelmä. Käytännössä pohjarakenteiden kokonaisvarmuusluvun sortumista tulee olla vähintään 1,3-1,5. [13] Toisaalta suurempi varmuuskerroin pienentää penkereen vie-reen syntyviä sivusiirtymiä sekä siirtymistä aiheutuvia lisäpainumia. Tämä on myös yksi syy käyttää riittävän suurta varmuuskerrointa vakavuuslaskelmissa. [22]

Koska massojen liikkeistä ja luiskien sortumista voi aiheutua henkilövahinkoa ja suuria taloudellisia menetyksiä, on suunnitteluohjeissa esitetty kokonais- ja osavarmuuskertoimille erilaisia arvoja, joita käytettäessä sortumariskin ja rakenteen toiminnan arvioidaan olevan hyväksyttävissä rajoissa. [18] Varmuusluvuissa on pyritty huomioimaan se, että eri olosuhteissa ja tilanteissa sortumasta aiheutuu erilaisia seuraamuksia. Käytännössä tämä merkitsee sitä, että esimerkiksi alueilla joissa on pysyviä rakenteita, tulee käyttää suurempaa varmuuskerrointa kuin alueilla, joissa vastaavia rakenteita ei ole. Näin menetellen pienennetään sortuman todennäköisyyttä olosuhteissa, joissa niistä on enemmän haittaa. Näin sortumariski pysyy eri alueilla jotakuinkin yhtä suurena, kun riskiä arvioidaan sortuman todennäköisyyden ja sortuman seurausten tulona. Yleisten suunnitteluohjeiden mukaiset osavarmuusluvut on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 1. Tiepenkereen mitoituksessa käytettävät osavarmuusluvut Teiden pohjarakenteiden suunnitteluperusteet ohjeen mukaan. Ylemmässä taulussa olevia arvoja käytetään kun tie-alueella ei ole pysyviä rakenteita ja alempia kun alueella on pysyviä rakenteita.

Kuormitus-tilanne	Kuormien osavarmuusluvut			Maaperän ominaisuuksien materiaalien osavarmuusluvut		
	Pysyvä		Muuttuva	kitka [$\tan \phi$]	koheesio [c]	suljettu leikkaus- lujuus [c_u]
	Epäsuotuisa	Suotuisa				
työnaikainen	1,0	1,0	1,0	1,1	1,3	1,3
käyttötila	1,0	1,0	1,0	1,2	1,5	1,5

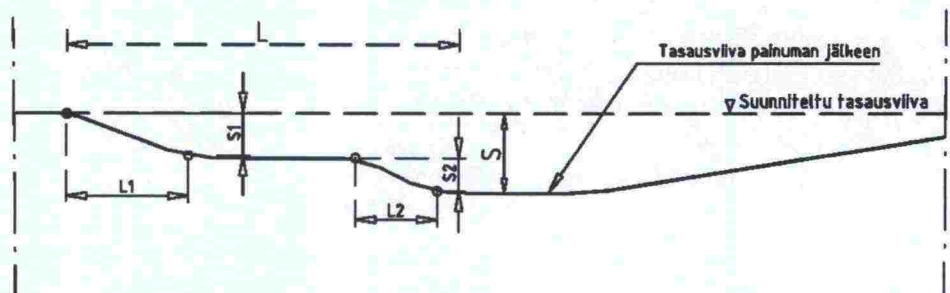
Kuormitus-tilanne	Kuormien osavarmuusluvut			Maaperän ominaisuuksien materiaalien osavarmuusluvut		
	Pysyvä		Muuttuva	kitka [$\tan \phi$]	koheesio [c]	suljettu leikkaus- lujuus [c_u]
	Epäsuotuisa	Suotuisa				
työnaikainen	1,0	1,0	1,0	1,2	1,5	1,5
käyttötila	1,0	1,0	1,0	1,25	1,8	1,8

4.2.2 Painuma

Vakavuuden ohella rakenteen painuma on tärkein tien pohjarakenteiden mitoituksessa huomioon otettava seikka. Maapohjan painuminen ei saa olla niin suurta, että siitä aiheutuu haittaa tierakenteelle tai tien käytölle. Tierakenteen toiminnan kannalta liialliset painumat saattavat heikentää tierakenteen pintakuivatusta sivuttaiskaltevuuden jäädessä liian pieneksi samalla kun päällysteeseen syntyy painumien seurauksina halkeamia. Yhdessä muiden tekijöiden kanssa nämä lyhentävät tierakenteen elinikää. Toisaalta painumista aiheutuu tielle mm. liian suuria sivukaltevuuksia sekä lyhyellä matkalla tapahtuvia pitkittäisprofiilin muutoksia. Näiden seurauksena liikenneturvallisuus sivukitkan pienenemisen seurauksena heikkenee, samalla kun tien liikennöitävyys ja ajomukavuus heikkenevät kuljettajan kokeman pystykihtyvyyden kasvaessa. Edellä mainittujen haittojen poistamiseksi on tien pohjarakenteiden suunnitteluperusteissa esitetty kaksi erilaista kriteeriä painumaongelmien poistamiseksi, jotka ovat sallittu kokonaispainuma sekä sallittu kulmamuuutos. Kummallekin kriteerille on esitetty ohjeelliset raja-arvot, joita rakenteen ei tulisi 30 vuoden elinkaarensa aikana ylittää. [18] Jos näin tapahtuu, rakenteen katsotaan olevan siinä kunnossa, että se vaatii korjaamista. Yllättävien painumien ja painumaeroja aiheuttavia riskitekijöitä ovat esimerkiksi:

- painumaparametrien määrittämisen epätarkkuus
- parametrien nopea vaihtelu maakerroksissa
- laskentamallien epätarkkuus
- geoteknisten kerrosten paksuuden muutokset
- pohjavedenpinnan muutokset rakentamisen jälkeen.

Yleensä rakenteet kestävät melko hyvin suuriakin tasaisia painumia, kun taas lyhyellä matkalla syntyvät pienetkin painumaerot voivat olla vahingollisia ja vaatia korjauksia. Suurimmat sallittujen painumien raja-arvo tierakenteilla perustuukin suurelta osin siihen, että suuret sallitut kokonaispainumat aiheuttavat väistämättä myös suuria painumaeroja. Tämän vuoksi myös kokonaispainumia on pyritty rajoittamaan. Kuvassa 3 on esitetty painuman pituuden, kokonaispainuman ja osapainumien määrittäminen tien pituusleikkauksessa.



KUVA 3. Painuman pituuden, kokonaispainuman ja osapainumien määrittäminen. [18]

Rajapituutta L_r pienemmillä painuman pituuksilla ($L < L_r$) on noudatettava sallitun kaltevuuden kriteeriä, jonka tulee täyttää kaavojen 6 mukaiset ehdot.

kun $L < L_r$, niin

$$\begin{aligned}\Delta pk &\leq \frac{S}{L} \\ \Delta pk &\leq \frac{S_1}{L_1} \\ \Delta pk &\leq \frac{S_2}{L_2}\end{aligned}\tag{6}$$

Rajapituutta L_r suuremmilla painuman pituuksilla ($L > L_r$) on noudatettava sallitun kaltevuudenmuutoksen kriteeriä sekä sallitun painuman maksimiarvon kriteeriä, joiden tulee täyttää kaavan 7 ehdot.

kun $L < L_r$, niin

$$\begin{aligned}\Delta pk &\leq \frac{S}{L} \\ \Delta pk &\leq \frac{S_1}{L_1} \\ S &\leq S_{\max}\end{aligned}\tag{7}$$

Tien hankekohtaisissa tuotevaatimuksissa on esitetty sallitut laskennalliset tien pituus- ja poikkisuuntaiset kaltevuudenmuutokset sekä sallittu painuman maksimiarvo, joita urakoitsijan tulee noudattaa tietyllä tieosuudella. Nämä saattavat poiketa hieman tien pohja- ja päällysrakenteiden yleisistä suunnittelukriteereistä. Esitetyt arvot perustuvat tien ajodynamiikan toimivuuteen, tien kuivatuksen varmistamiseen, rakenteen jäykkyyteen sekä tiehen sijoitettaviin muihin rakenteisiin niiden asettaessa lisärajoituksia painumille. Lisäksi tuotevaatimuksissa on usein esitetty sallitut kaltevuuden muutokset ja painumien raja-arvot viiden vuoden kuluttua rakentamista. Nämä raja-arvojen tavoitteena on varmistaa takuuajan lopussa rakenteen toimivuus ja alla vertailuperustana maksettaessa urakoitsijalle kuuluvaa urakkasummaa. Poikkeamat takuuajan raja-arvoista johtavat arvonvähennyksiin urakoitsijalle maksettavasta urakkasummasta, siten kuin asiasta on urakkasopimuksessa mainittu. Mikäli hanke- ja kohdekohtaisissa laatuvaatimuksissa ei ole esitetty raja-arvoja, tulee vastaavina raja-arvoina käyttää tien pohja- ja päällysrakenteiden suunnitteluperusteet ohjeessa julkaistuja raja-arvoja, jotka on esitelty taulukossa 2. Taulukossa 3 on puolestaan esitetty [18] esimerkki yleensä käytetyistä toimivuusvaatimuksista takuuajana eli viiden vuoden kuluttua rakentamisesta.

Taulukko 2. Tienpinnan sallitut kaltevuuden muutokset, suurin sallittu painuman maksimiarvo ja sivukaltevuuden muutokset 30 vuoden aikana asfalttipäällysteisillä teillä Teiden pohjarakenteiden suunnitteluperusteet –julkaisun mukaan.[18]

Tien toiminnallinen luokka (Mitoitusnopeus [km/h])	Sallittu pituuskaltevuuden muutos Δp_k [%]	Sallittu painuman maksimiarvo S_{max} [mm]	Rajapituuden arvo L_r [m]	Sallittu sivukaltevuuden muutos [%]
Moottoriväylät (120 km/h)	0,6	400	67	1,5
Päätiet (105km/h)	0,8	500	63	1,5
Seudulliset tiet (90km/h)	1,1	600	55	2,0
Paikallisväylät (80km/h)	1,6	700	44	2,0
(60km/h)	2,2	800	36	2,0

Taulukko 3. Esimerkki hankkeissa käytetyistä tuotevaatimuksista. Tienpinnan sallitut kaltevuuden muutokset, sallittu painuman maksimiarvot ja sivukaltevuuden muutokset takuuaikana eli 5 vuoden kuluttua rakentamisesta aikana asfalttipäällysteisillä teillä. [18]

Tien toiminnallinen luokka (Mitoitusnopeus [km/h])	Sallittu pituuskaltevuuden muutos Δp_k [%]	Sallittu painuman maksimiarvo S_{max} [mm]	Rajapituuden arvo L_r [m]	Sallittu sivukaltevuuden muutos [%]
Moottonväylät (120 km/h)	0,24	120	50	0,6
Päätiet (105km/h)	0,32	150	47	0,6
Seudulliset tiet (90km/h)	0,44	180	41	0,8
Paikallisväylät (80km/h)	0,64	210	33	0,8
(60km/h)	0,88	240	27	0,8

4.3 Riskien vähentäminen

Puhuttaessa pohjarakentamisen riskeistä tarkoitetaan yleensä ”yllätyksellisiä” tilanteita, joissa pohjarakenne ei toimi suunnitellulla tavalla. Yleensä suurin syy pohjarakenteiden suunnittelun ja toteutuneen toiminnan eroihin ovat väärin vallitut mitoitusparametrit sekä niiden arvioinneissa tehdyt virheelliset oletamat. Tarkat laskentamenetelmät ja niiden oikea käyttö eivät yhdessäkään pysty poistamaan lähtötiedoissa olevia virheitä. Koska parametrien määrittämiseen ja itse laskentamenetelmiin liittyy epätarkkuutta, tulee geoteknisiin laskelmiin suhtautua aina jonkinasteisella varauksella. Laskelmissa käytettyjen lähtöparametrien luotettavuuteen ja tarkkuuteen vaikuttavat muun muassa:

- tehtyjen pohjatutkimusten määrä
- pohjatutkimusten laatu
- suunnittelijan kokemus ja pätevyys.

Laskettu tulos edustaa siten parasta estimaattia, jonka suunnittelija on olemassa olevilla pohjatutkimuksilla ja laskentakeinoilla pystynyt arvioimaan ja siihen liittyy aina epävarmuutta.

Pohjatutkimusten tavoitteena on suunnittelun alkuvaiheessa selvittää pohjavahvistusten tarpeellisuus, tilanteeseen sopivat pohjarakennusmenetelmät

sekä niiden ympäristövaikutukset. Myöhemmässä vaiheessa tarkentuvien pohjatutkimusten tavoitteena on hankkia pohjarakenteiden ja työnaikaisten rakenteiden mitoituksessa tarvittavat yksityiskohtaiset lähtötiedot maakerroksista ja niiden geoteknisistä ominaisuuksista. [24]

Yleensä pohjarakenteiden suunnittelussa ei suoriteta tarkkoja riskitarkasteluja, koska tilastollisten tarkastelujen suorittamiseksi tulisi olla käytettävissä tietoa laskentaparametrien keskimääräisten arvojen lisäksi myös niiden hajonnoista. [12] Näitä ei yleensä ole saatavilla, koska käytössä ei ole riittävää määrää pohjatutkimus- tai laboratoriotuloksia. Usein laskentaparametrit valitaan suoraan tutkimustulosten varovaisena keskiarvona tai kokemuksen perusteella. Tapauskohtaisesti saatetaan lisäksi suorittaa herkkyyssanalyysi muuntelemalla laskentaparametreja arvioidun oikean arvon läheisyydessä. Tällöin rakenteen luotettavuudesta ei saada aivan tarkkaa tilastollista tietoa, mutta käytännön suunnittelussa menettely on usein riittävä.

Yksittäisessä pisteessä mitatun mitoitusominaisuuden vaihtelun lisäksi suunnittelussa tarvitaan tietoa parametrien vaihtelusta koko alueella. Parametrien lisäksi on tunnettava myös alueen geotekniset pohjaolosuhteet kuten maakerrosten paksuudet, maalajit, pohjaveden tasot sekä erilaiset kuormitusolosuhteet. [12] Koska edellä mainittujen ominaisuuksien mittaaminen perustuu suurelta osin pohjatutkimusten yhteydessä tehtäviin kairauksiin, on muistettava, että kairauksista saadut tulokset ovat voimassa vain kairauspisteen läheisyydessä. Maakerrosten ominaisuudet saattavat kuitenkin vaihdella melko jyrkästikin, joten pohjatutkimusten ja siten pohjarakenteiden mitoituksen luotettavuus riippuu paljolti tehtyjen pohjatutkimusten määrästä (tiheydestä) ja laadusta. Asiaa on tarkemmin käsitelty lähteessä [16].

Toinen tapa pohjarakenteisiin liittyvien toiminnallisten riskien vähentämiseksi liittyy suunnittelussa tehtyjen epävarmojen olettamien tai virheiden ennakkointiin jo suunnittelun aikana. Tämä ei yleensä pienennä riskin toteutumisen todennäköisyyttä, mutta riskitapahtuman seuraukset yleensä pienenevät.

Esimerkiksi epävarmat ratkaisut todetaan suunnitelmissa ja jätetään ratkaistaviksi rakentamisen yhteydessä, jolloin pohjarakenteen suunnitellun ja todellisen käyttäytymisen erot eli poikkeamat voidaan mitata. Kun poikkeamiin on varauduttu ennakolta, voidaan niiden seuraukset yleensä minimoida. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että alustavia suunnitelmia tarkennetaan rakentamisen aikana kun todelliset pohjaolosuhteet selviävät. Toisaalta enakkosuunnittelussa varaudutaan tarkkailemaan pohjarakenteiden käyttäytymistä sekä tehdään enakkosuunnitelmia poikkeamien korjaamiseksi. Esimerkkeinä tästä ovat riittävän painuma-ajan varaaminen maanvaraisille sekä esikuormitetuille penkereille sekä huokospaine ja sivusiirtymämittausten suorittaminen ja niiden avulla tapahtuva rakentamisen ohjaaminen rakennustyön aikana. Voidaankin siis sanoa, että mitä suurempi epävarmuus liittyy käytettyihin laskentaparametreihin ja geoteknisten olosuhteiden määrittämiseen, sitä enemmän painoarvoa tulee antaa rakentamisen aikaisille tarkkailumittauksille, kun halutaan päästä hyvään lopputulokseen. [19]

4.4 Riskien vaikutus elinkaarikustannuksiin

Eri pohjarakennusmenetelmien toiminnallinen onnistumisvarmuus eli riski vaihtelee eri pohjaolosuhteissa, minkä vuoksi ei voida yleisesti sanoa, että tietty pohjarakennustapa pitäisi sisällään tietyn epäonnistumisriskin. Riskin suuruuteen vaikuttavat myös suoritettujen pohjatutkimusten määrä sekä rakentamisen aikaiset tarkkailutoimet. Yleensä voidaan kuitenkin sanoa, että

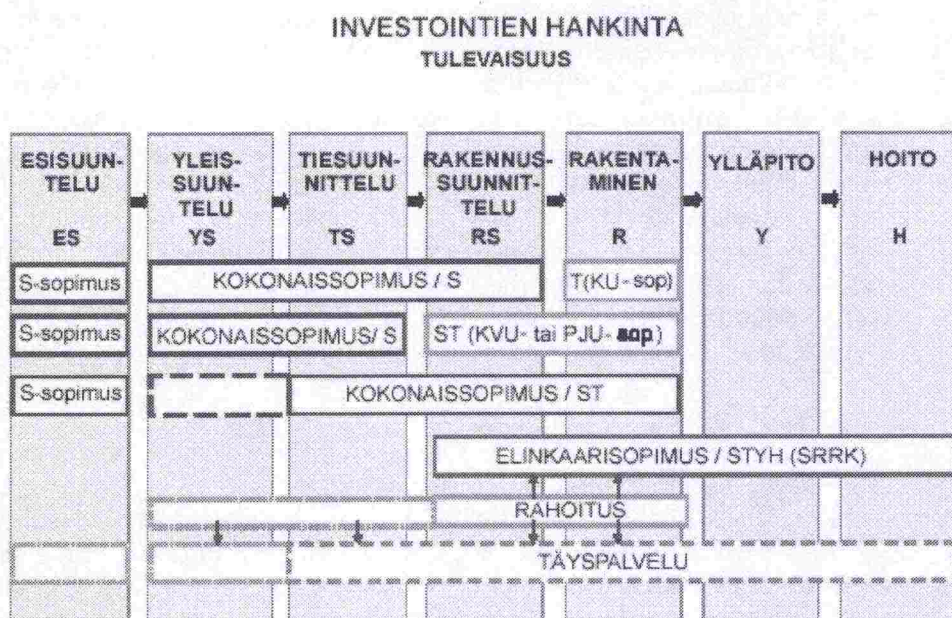
tietyillä pohjarakennustavoilla on suurempi epäonnistumisriski kuin toisilla. Esimerkiksi riski pystyöjitetun tai pelkästään esikuormitetun penkereen ennakoitua suuremmalle painumalle on suurempi kuin riski, että vastaava painuma syntyisi kaivamalla tehdyn massanvaihdon tai pengerpaalutuksen yhteydessä. Lisäksi eri menetelmien soveltuvuus myöhemmin tapahtuvan korjaamisen suhteen vaihtelee suuresti. Esimerkiksi kaivamalla tehdyn massanvaihdon yhteydessä syntyvien painumien korjaaminen uudelleen päällystämällä on yleensä helppoa, kun taas pystyöjituskohteissa uusi päällystäminen kiihdyttää painumaa entisestään, jolloin korjaaminen voi olla tehotonta. Tästä syystä pohjarakentamisen riskit eli todennäköisyys riittämättömän vakavuuden aiheuttamille vahingoille sekä painumien syntymiselle ja niiden korjattavuudelle tulisi ottaa huomioon pohjanvahvistusmenetelmää valittaessa. [19]

Pohjarakennusriskien osalta voidaan yleisesti todeta, että mitä enemmän mitoituksessa on sallittu käytettäväksi rakentamisen jälkeen tapahtuvaa painumaa, sitä suurempi riski menetelmällä on epäonnistua, jos mitoituksen yhteydessä käytetyt painumaparametrit osoittautuvat epätarkoiksi. Ennakoitua suuremmasta painumasta aiheutuvan riskin vaikutusta elinkaarikustannuksiin on tarkasteltu esimerkkilaskelmien yhteydessä arvioimalla eri ratkaisujen toteutumisvarmuutta ja todennäköisyyttä ja niistä aiheutuvia kustannuksia. Yleensä voidaan vielä todeta, että mitä painumattommasta pohjarakenteesta on kyse, sitä kalliimmaksi se yleensä tulee rakentaa. Toisaalta painumattomilla rakenteilla onnistumisvarmuus on hyvä ja painumakorjausriski on siten hyvin pieni.

4.5 Urakkamuotojen vaikutus elinkaarikustannuksiin

4.5.1 Jako eri urakkamuotoihin

Kuvassa 4 on esitetty Tiehallinnon Tienpidon hankintastrategian [17] mukainen jako eri urakkamuotoihin. Tässä tekstissä rajoitutaan vertailemaan keskenään perinteisen urakan eli T-urakan, ST-urakan ja elinkaaarisopimuksen ominaisuuksia ja näiden urakkamuotojen vaikutusta pohjarakenteiden elinkaarikustannuksiin. Tässä tekstissä on arvioitu lähinnä kuinka edellä esitettyjä urakkamuotoihin voitaisiin soveltaa elinkaarikustannusten laskentaa ja mitä etuja ja haittoja tästä saattaa syntyä.



Kuva 4. Investointien hankintatavat tulevaisuudessa. [17]

4.5.2 T-urakka

T- eli toteutusurakka on perinteinen pääurakkamuoto, jossa tilaaja vastaa hankkeen suunnittelusta aina rakennussuunnitteluun asti. Urakoitsijalle vastuu rajoittuu projektin johtamiseen ja rakennustyöhön. Maksumekanismi on yleensä sellainen, että urakoitsija sitoutuu tekemään rakennustyön urakka-asiakirjojen mukaisesti valmiiksi laskelmallaan kiinteällä kokonaishinnalla, joka maksetaan urakoitsijalle työn edistymisen mukaan vaiheittain. Urakoitsijalle jää rakentamiseen liittyvät riskit, kuten hintojen ja määrien muutoksista aiheutuvat poikkeamat oletetusta. [10] Urakoitsija vastaa siitä, että urakoitsijan tekemä työ on tehty suunnitelmien mukaisesti. Urakoitsija vastaa omasta työstään takuuajana, mutta urakoitsija ei kuitenkaan vastaa vioista, jotka ovat syntyneet urakoitsijasta riippumatta, kuten huonoista suunnitteluratkaisuista aiheutuneet korjaustarpeet. Nämä korjaukset jäävät pohjarakenteiden osalta tilaajan vastuulle. Vastuuajka on yleensä lyhyt eli 2 vuotta rakentamisesta. [8]

Huonona puolena urakkamuodossa on se, että elinkaarikustannusten optimointi jää rakennuttajalle ja hänen valitseman yksittäisen suunnitteluosapuolen vastuulle. Perinteisesti tässä urakkamuodossa ei elinkaarilaskelmia ole tehty. Ratkaisut ovat perustuneet suunnitteluohjeiden mukaisiin valintoihin, siten että niiden vaatimukset ovat täyttyneet. Tällöin erilaiset ratkaisumallit saattavat jäädä yksipuolisiksi ja innovatiivisia ratkaisuja ei pääse syntymään. Urakoitsija voi tosin esittää muutoksia suunnitelmaan. Todellisten elinkaarikustannusten suuruus riippuu lähinnä valitun suunnitteluosapuolen kyvykkydestä sekä suunnittelijalle annettujen lähtötietojen määrästä ja laadusta. Urakkatarjousten vertailu on tässä urakkamuodossa kuitenkin helppoa, koska urakkatarjouksia voidaan suoraan verrata toisiinsa.

Tässä urakkamuodossa rakennuttajan keinot vaikuttaa elinkaaren kustannuksiin liittyvät lähinnä suunnittelijan valintaan ja suunnittelijalle annettaviin ohjeisiin laatutasosta. Mikäli elinkaarikustannuksia halutaan minimoida tässä urakkamuodossa, tulisi suunnittelijalle antaa ohjeistus elinkaarikustannusten

suorittamisesta ja edellyttää näitten laskelmien suorittamista. Ohjeet voisivat olla hieman suppeammat kuin esimerkiksi ST-urakassa, sillä tehtyään tietyt oletukset tulevaisuudesta suunnittelija voi soveltaa samoja oletuksia kaikkiin laskelmiin. Koska elinkaarilaskelmat tehdään vain yhden osapuolen toimesta, laskelmat ovat suoraan vertailukelpoisia toisiinsa nähden. Maksumekanismit eivät tue elinkaarilaskennan optimointia, koska riskiä syntyvistä korjauskustannuksista ei voida siirtää urakoitsijalle tai suunnittelijalle, vaan kaikki riski elinkaaren kustannuksista säilyy tilaajalla.

4.5.3 ST-urakka (KVU)

ST-urakalla tarkoitetaan urakkamuotoa, jossa urakoitsija vastaa myös tien suunnittelusta. Tilaaja toimittaa yleensä urakoitsijalle suunnittelua varten tuote- ja toimivuusvaatimukset, joiden pohjalta suunnitteluratkaisut on laadittava. Toimivuusvaatimukset liittyvät yleensä liikennöitävyyteen ja tien toiminnallisuuteen. Pohjarakenteiden osalta vaatimukset ovat lähinnä teknisiä tuotevaatimuksia, joita on esitetty edellä. Maksumekanismina on yleensä kokonaishinta. [17] Koska tilaaja määrittää tuotevaatimukset, niiden osalta vastuu säilyy tilaajalla. Takuuaika rakentamisen jälkeen on yleensä viisi vuotta. Urakkamuodon etuna on se, että sillä voidaan toteuttaa myös pieniä ja keskisuuria kohteita.

Elinkaarikustannusten huomioiminen tässä urakkamuodossa on hankalaa. Tarjousten vertaaminen toisiinsa on erittäin vaikeaa, koska elinkaarikustannusten laskeminen perustuu moniin oletuksiin, joiden kaikkien täytyy olla kaikilla laskijoilla samat, jotta saadut elinkaarikustannukset ovat vertailukelpoisia. Tällaisia oletuksia ovat esimerkiksi käytettävä laskentakorko, laskentajakson pituus, tienkäyttäjän kustannusten määrittäminen ja rakenteen jäännösarvo. Esimerkkejä tehdyistä laskentaolettamista on tämän esitetty tämän tekstin laskentaesimerkkien alussa. Mikäli laskennassa käytettävät oletukset yhdenmukaistetaan tilaajan toimesta ja ne ovat realistisella tasolla, tarjoukset ottaisivat automaattisesti huomioon elinkaaren kustannukset.

Todellisuudessa urakoitsijan ei kannata urakan voittaakseen minimoida todellisia elinkaaren kustannuksia, vaan urakoitsijan kannattaa minimoida rakentamiskustannukset ja itselleen ensimmäisten viiden vuoden aikana syntyvät arvonalennukset ja korjauskustannukset. Siten myöhemmin elinkaaren aikana syntyvät kustannukset eivät todellisuudessa aina minimoidu. Urakoitsija ei myöskään joudu maksamaan tien käyttäjän kustannuksia, joten niiden minimoiminen ei ole urakoitsijan kannalta tärkeää. Tämä urakkamuoto ei siten itsestään pyri optimoimaan elinkaarikustannuksia. Mikäli esimerkiksi tienkäyttäjän kustannuksia ja sitä kautta elinkaaren kustannuksia haluttaisiin alentaa, tulisi maksumekanismeja kehittää siten, että urakoitsija joutuisi maksamaan normaalien arvonalennusten lisäksi korvausta tien pitäjälle siltä ajalta, jonka tie on poissa liikenteen käytöstä korjauksen vuoksi. Tällöin syntyisi todellinen syy ottaa huomioon kaikki elinkaaren kustannukset. Korvausten määrän ja tien käyttäjän kustannusten arvioiminen tienkäyttäjän kustannusten perusteella jäisi käytännössä kuitenkin tilaajan vastuulle. Tämä tarkoittaisi sitä, että urakoitsijan tulisi hinnoitella tarjoukseensa myös riski mahdollisista korvauksista ja siten nostaa tarjouksensa hintaa. Tilaajalle tämä tarkoittaisi kalliimpia pohjarakenteita ja sitä, että käytännössä tien pitäjä joutuisi reaalisesti maksamaan osan siitä summasta, joka nyt jää tien käyttäjän maksettavaksi.

Nykyään käytössä olevat maksumekanismit kuten arvovähennykset, sakot tai korjausvelvoitteet on sidottu sidottuna tienpituus- ja sivuttaiskaltevuuteen sekä sallittuun kokonaispainuman raja-arvoon. Maksumekanismien tarkoituksena on ohjata urakoitsijaa kohti elinkaarikustannuksiltaan alhaisempaa

rakennetta. Nämä maksumekanismien tulisi määritellä siten, että urakoitsija pyrkisi pysymään annettujen tuotevaatimusten raja-arvojen sisäpuolella, ottaen samalla huomioon tekemiensä valintojen sisältämän riskin epäonnistua. Tämän selvityksen esimerkkikappaleessa on esitetty yksi malli riskien huomioonottamiseksi elinkaarilaskelmissa. Tavoitteena on toisaalta karsia myös liian kalliit ja varmat ratkaisut ja siten varmistaa elinkaarikustannusten minimoiminen.

Koska tässä tekstissä esitetyt elinkaarilaskelmat perustuvat suunnittelupe-
rusteissa esitettyihin tuotevaatimusten raja-arvoihin, pitävät esimerkkilas-
kelmat jo sisällään olettan, että kyseiset raja-arvot itsessään optimoivat
tierakenteen elinkaaren kustannuksia. Maksumekanismien tehtävänä on siis
ohjata suunnittelua sitä kohti, että raja-arvoja ei ylitetä, mutta niitä ei myös-
kään kannata maanvaraisissa ratkaisuissa yleensä suotta alittaa. Mikäli me-
netelmän mitoituksessa on kuitenkin melko suurta epävarmuutta, saattaa
olla järkevää mitoittaa rakenteen painuma selvästikin alle vaatimusten. Ti-
lannekohtaisesti saattaa olla teknisesti järkevää valita lähes painumaton ra-
kenneratkaisu, jolloin painumarajat luonnollisesti alittuvat selvästi, vaikka
tämä ei pelkästään painuman kannalta olisikaan järkevää. Tekstin esimerk-
kilaskelmien nojalla ei tule tehdä johtopäätöksiä siitä, ovatko tuotevaatimus-
ten raja-arvot oikein määritetty. Tuotevaatimusten raja-arvojen tulee perus-
tua ja suurelta osin ne perustuvatkin esimerkiksi liikenteen sujuvuuteen, tur-
vallisuuteen sekä rakenteen teknisen toimivuuden varmistamiseen.

4.5.4 Elinkaarisopimus

Elinkaarisopimuksella tarkoitetaan hankamenettelyä, jossa urakoitsija vastaa
suunnittelun ja rakentamisen lisäksi myös rakenteen ylläpidosta ja hoidosta
sovittavan sopimuskauden pituuden verran. Käytännössä nämä sopimus-
kaudet ovat 15-30 vuoden pituisia. Vaikka tämä ajanjakso ei vastaa raken-
teen koko elinkaarta, vastaa se kuitenkin suurinta osaa koko elinkaaren kus-
tannuksista.

Elinkaarisopimuksesta on etua molemmille osapuolille, vaikka urakkamuoto
ei olekaan aivan yksinkertainen. Omalla tavallaan se on kuitenkin selväpiir-
teinen. Urakoitsijalle voidaan antaa ohjeet tien toimivuusvaatimuksina tark-
kojen tuotevaatimusten sijaan. Urakoitsija antaa tarjouksen, joka sisältää
kaikki kustannukset sopimuskauden aikana. Tarkasti ottaen urakoitsijan ei
tässäkään urakkamuodossa kannata laskea mukaan tienkäyttäjän kustan-
nuksia, koska urakoitsija ei niistä joudu vastaamaan. Toisaalta toimivuus-
vaatimukset saattavat sisältää maksumekanismina ominaisuuden, joka ottaa
tämän huomioon. Esimerkki tällaisesta olisi maksuperuste, jonka mukaan
urakoitsijalle maksetaan siitä, että tie on liikenteen käytössä. Tässäkin tilaaja
joutuu määrittämään tien käyttäjälle aiheutuvat kustannukset ja määrittä-
mään sitä kautta sopivan toimivuusvaatimuksen.

Koska tilaaja ei joudu määrittämään monia elinkaarilaskennassa tehtäviä
olettamia, joutuu urakoitsija tekemään tämän. Tämä asettaa suunnittelijalle
lisävaatimuksia nykyiseen suunnitteluun verrattuna. Tällöin riski tehtyjen
olettamien oikeellisuudesta siirtyy täysin urakoitsijalle. Samoin käyttökelpoi-
sten toimivuusvaatimusten ja maksuperusteiden sekä niiden mittausperuste-
iden määrittäminen oikealle tasolle saattaa olla hankalaa. Ongelmana on
yleensä se, että toimivuusvaatimuksiin sidotut maksumekanismit kuten lii-
kenteen sujuvuus tai keskimääräinen nopeus vaikuttavat niin epäsuorasti
pohjarakenteiden kustannuksiin, että pohjarakenteiden elinkaarilaskelmien
tekeminen saattaa muodostua erittäin vaikeaksi.

Hyvänä puolena urakkamuodossa on se, että se antaa urakoitsijalle paljon valinnan vapautta toteutusratkaisun valinnassa. Toimivuusvaatimuksia ei ole järkevää esittää pohjarakenteille, vaan ne esitetään tielle kokonaisuutena, mitä kautta ne vaikuttavat epäsuorasti pohjarakenteiden valintaan. Toimivuusvaatimuksena voi tiellä olla esimerkiksi tietty liikenteen keskinopeus, liikennemäärä ja liikenteen vapaa kulku ja häiriöttömyys. Näiden toimivuusvaatimusten pohjalta arvioidaan ne tekniset ratkaisut eli tekniset tuotevaatimukset, joilla haluttuun rakenteen toimivuuteen päästään. Tässä on se mahdollisuus, että urakoitsijat voivat halutessaan käyttää hieman toisistaan poikkeavia teknisiä tuotevaatimuksia tierakenteelle. Rajat tuotevaatimusten muokkaamiselle voidaan antaa tilaajan toimesta esimerkiksi yleisissä suunnitteluperusteissa.

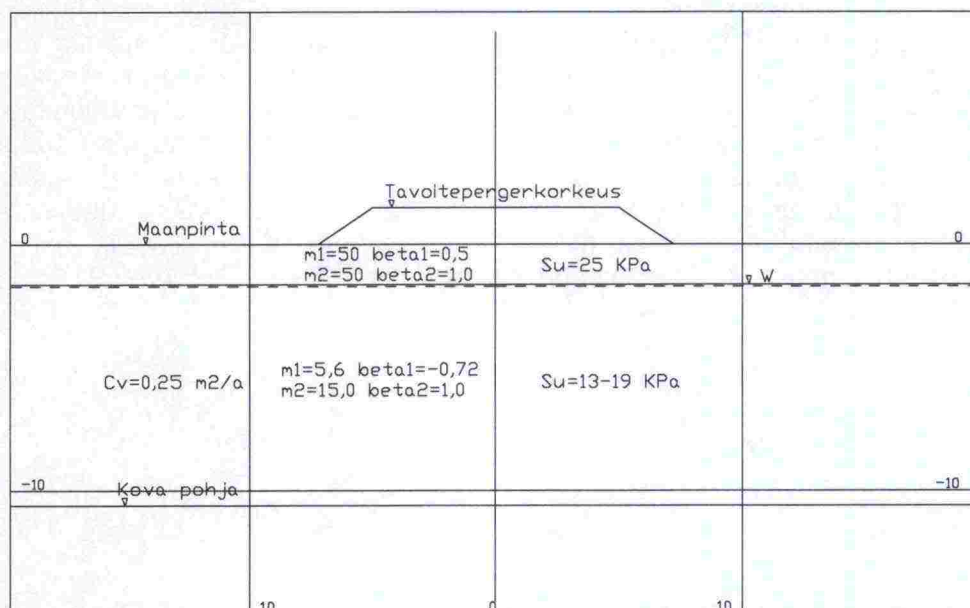
Elinkaarisopimuksen ongelmana on se, että hankintamenettely sopii lähinnä isoihin hankkeisiin. Koska elinkaarilaskennan tulokset eivät ole eivätkä koskaan tulekaan täysin luotettaviksi, siirtyy urakoitsijalle melkoinen kustannusriski tulevaisuuden kannalta. Tämä riski urakoitsijan täytyy ottaa huomioon hinnoittelussaan, jolloin kustannukset tilaajan kannalta saattavat nousta. Toisaalta tilaajan vakavaraisuuteen ja taloudelliseen kantokykyyn joudutaan kiinnittämään paljon enemmän huomiota kuin muissa urakkamuodoissa. Riskin siirtäminen kannattaa, mikäli urakoitsijan riskinhallintakyky ja tuotannon tehostuminen ylittää valtion ja yritysten luottomarginaalien eron. [17]

5 ELINKAARIKUSTANNUKSET ESIMERKKIKOhteessa

5.1 Lähtötilanne elinkaarikustannusten laskemiseksi

5.1.1 Esimerkkikohteen valinta

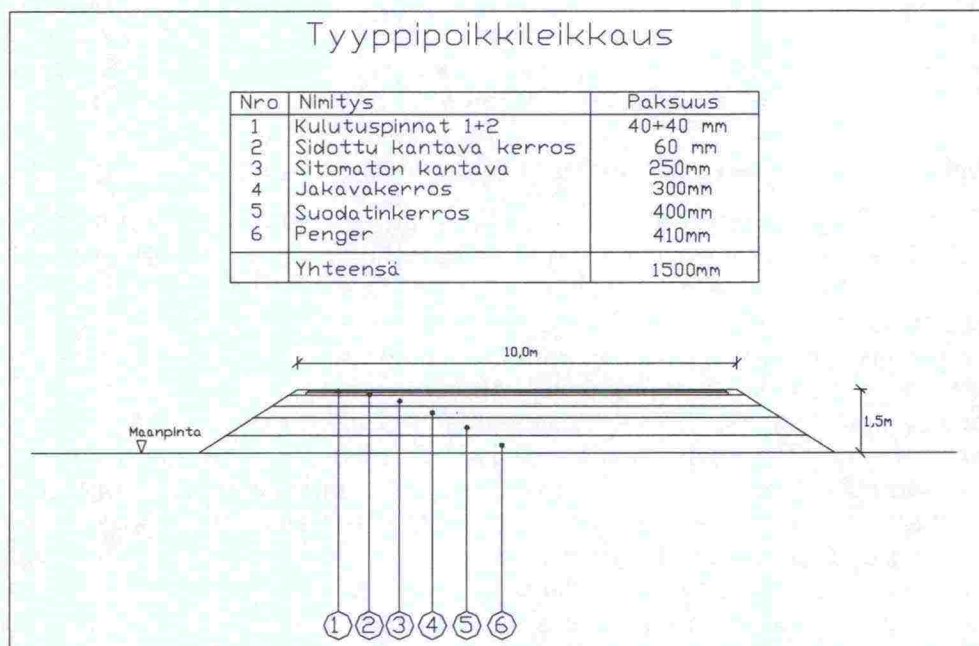
Esimerkkikohte on valittu todellisesta kohteesta mitattujen pohjasuhtetietojen perusteella, jolloin eri maaparametrien suhteellinen suuruusluokka on keskenään järkevässä suhteessa. Pohjamaa on tulkittu kahteen erilaiseen geotekniseen kerrokseen pohjatutkimusten perusteella kuvan 5 mukaisesti.



Kuva 5. Esimerkkikohteen geotekniset kerrokset ja perusmitoitusparametrit

Kuvan 5 mukaisesti pohjamaa koostuu noin 1,6 metrin paksuisesta kuiva-kuorikerroksesta sekä sen alla olevasta n. 9,0 m paksuisesta leikkauslujuudeltaan heikommasta ja kokoonpuristuvammasta savikerroksesta. Kuivakuoren oletetaan puristuvan kokoon rakentamisen aikana. Savikerroksen konsolidaatiokerroin $C_v=0,25$ m²/a ja sen oletetaan tilanteen pysyvän esimerkissä samana koko jännitysalueella riippumatta käytetystä kuormituksesta. Lisäksi saven oletetaan olevan normaalisti tai hyvin vähän ylikonsolidoitunut. Savikerroksen leikkauslujuus $S_u=13-19$ kPa edustaa kerroksellisen maan leikkauslujuuden vaihtelua, mutta vakavuustarkasteluissa on saven leikkauslujuus käytännössä valittu alemman rajan mukaan, joka sijaitsee lähempänä maanpintaa. Murtopinnan voidaan olettaa sijaitsevan tässä heikossa vyöhykkeessä.

Pohjamaan päälle on esimerkkitalanteessa rakennettava 1,5 m korkea penger. Esitetty pengerkorkeus on valittu siksi, että se on riittävän korkea penger, jotta siihen voidaan rakentaa näin pehmeällä pohjalla vaadittavat rakenekerrokset, mutta se on riittävän matala, jolloin sitä varten voidaan realistisesti mitoittaa useita erilaisia pohjarakennusratkaisuja. Penkereen yläosan leveydeksi on valittu 10,0 m. Mitoitettavan penkereen tyyppipoikkileikkaus maanvaraisesti perustettaessa on esitetty kuvassa 6 ja sitä on käytetty apuna arvioitaessa erilaisten korjausvaihtoehtojen mukaisia massamääriä ja korjauskustannuksia.



Kuva 6. Esimerkkipenkereen tyypipipoikkileikkaus perustettaessa maanvaraisesti.

Esimerkkikohde on vähintään valtatieasoinen ratkaisu, jonka KVL on n. 10 000 ajoneuvoa vuorokaudessa. Nämä tiedot ovat toimineet lähtötietona valittaessa mahdollisia rakennekerroksia ja teknisesti kelpollista tyypipipoikkileikkausta. Samoin tien laatutason valinta heijastuu suoraan korjaustarpeen syntymiseen, koska erilaatuisilla tieosuuksilla tielle asetetut laatuvaatimukset painumien suhteen vaihtelevat kuten on esitetty taulukossa 2 ja 3. Tien laatutason mukaan voidaan arvioida tieosuuden nopeudeksi 80-100 km/h. KVL:n ja keskinopeuden perusteella voidaan arvioida korjauksesta tai uudelleenpäälystymisestä tien käyttäjälle syntyviä kustannuksia.

5.1.2 Pohjarakenteiden ja korjaustoimenpiteiden mitoittaminen

Pohjarakenteiden ja korjaustoimenpiteiden mitoittaminen perustuu suurimmaksi osaksi penkereen osalta tehtyihin painumaennusteisiin. Painumien lisäksi on varmistettu laskelmilla, että ratkaisut ovat järkeviä ja toteuttamiskelpoisia myös vakavuuden suhteen. Painuma- ja vakavuuslaskelmat on tehty seuraavilla M. Smuran laatimilla ohjelmilla:

- Syvästabiloinnin mitoitus V. 3.0 (7.4.2002)
- Tiepenkereen vakavuus V. 3.04 (19.5.1999)
- Tiepenkereen painuma V. 3.2 (10.6.2001)
- Pystyojien mitoitus V. 1.2 (23.1.1995).

Muilta osin pohjarakenteet on pyritty mitoittamaan noudattaen Tiehallinnon julkaisemia pohjarakenteiden mitoittamiseen liittyviä ohjeita ja yleisiä työselityksiä noudattaen, siten että tuotevaatimusten mukaiset mitoitusraja-arvot eivät ylitä. Käytettyjä ohjeita ja yleisiä työselityksiä ei tässä kohtaa esitellä tarkemmin.

Pohjarakenteiden mitoittamisen osalta julkaisuissa ja ohjeissa on ohjeet kuinka erilaisissa mitoitustilanteissa tulee menetellä. Samoissa julkaisuissa ei kuitenkaan ole yhtä selkeästi todettu erilaisiin korjaustoimenpiteisiin liittyviä ongelmia, jotka liittyvät esimerkiksi korjausajankohdan, korjausmenetel-

män, ja korjauksen jälkeen sallittavien painumien ja kulmamuuutosten suuruuden valintaan. Lähtökohdaksi korjaustyön mitoittamiselle ja korjaustyön ajoittumiselle on tässä esimerkissä otettu yleisissä suunnitteluperusteissa esitetyt raja-arvot suurimmiksi sallituiksi painumiksi ja kulmamuuutoksiksi tietynä aikana rakentamisen jälkeen. Korjaukset on luokiteltu kahteen osaan.

5.1.3 Painumien suuruudesta aiheutuva korjaus

Painumakorjaukseen ryhdytään, kun tiepenger on painunut yli 500mm alkuperäiseen tilanteeseen verrattuna. Painumakorjaustoimenpiteet ovat suurempia korjauksia, jolloin tienpinta nostetaan lähemmäs haluttua tavoitekorkeutta, samalla painuman suuruutta korjauksen jälkeen on rajoitettu. Samoin painumakorjauksia tehdään yleensä vain päällystämällä tieosuus uudelleen aika ajoin. Päällystäminen poistaa yleensä ainakin lyhytaikaisesti haitallisen epätasaisuuden, joka on tien toimivuuden kannalta tärkeämpää kuin mahdolliset laaja-alaiset painumat tiessä vaikka ne olisivat melko suuriakin. Koska suuri keskimääräinen painuma merkitsee kuitenkin useimmiten myös suuria painumaeroja eri tienosien välillä edustaakin suurimman keskimääräisen sallitun painuman ylittyminen epäsuorasti myös painumaeroja, joista painumakorjaustarve todellisuudessa syntyy. Näiden todellisten painumaerojen tasoittamisesta syntyvien kustannusten arvioimiseksi on esimerkissä laskettu kustannukset keskimääräisen painuman ja sen perusteella tehdyn kustannuslaskelman avulla.

Painumakorjaus toteutetaan seuraavasti. Tienpinta nostetaan korjauksen yhteydessä 250 mm päähän alkuperäisestä tasosta, sillä rakenteen nostaminen täyteen korkeuteen ei yleensä ole tarpeen epätasaisuuksien poistamiseksi. Lisäksi tällainen korjaus pienentää kustannuksia sekä vähentää korjaamisen jälkeen syntyvää painumaa, toisaalta tätä suurempaa painumaa ei ole haluttu hyväksyä toimivalle rakenteelle. Korjaus mitoitetaan siten, että korjauksen jälkeinen painuma on enintään 100 mm. Siten kokonaispainuma alkuperäiseen tilanteeseen verrattuna on enintään 350 mm.

5.1.4 Sivukaltevuuden muutoksista aiheutuva korjaus

Korjaustoimenpiteeseen ryhdytään kun] raja-arvot ylittyvät. Raja-arvona on tässä tapauksessa käytetty 0,6 % ensimmäisen 10 vuoden aikana rakentamisesta. Tien kaltevuuden muutoksista aiheutuvaan tien päällysteen uusimiseen, joka toteutetaan esimerkikappaleessa enintään 10 vuotta rakentamisen alusta sekä varsinaiseen painumakorjaukseen, joka voidaan toteuttaa milloin tahansa elinkaaren aikana. Päällysteen uusiminen korjaustoimenpiteenä on rajoitettu 10 ensimmäiseen vuoteen, sillä päällysteen normaalin kulumisen vuoksi päällyste joudutaan uusimaan keskimäärin 6 vuoden välein, jolloin kaltevuuden muutokset voidaan korjata uudelleenpäällystämisen yhteydessä ilman merkittäviä lisäkustannuksia. Mikäli rakenteelle joudutaan tekemään painumakorjaus ennen kuin 10 vuotta rakentamisesta on kulunut, ei tämän painumakorjauksen jälkeen enää synny tarvetta päällystekorjaukselle.

5.1.5 Muut elinkaarikustannuslaskelmien lähtöoletukset

Elinkaarikustannusten laskentaa ja siihen liittyviä valintoja kuten korkokannan, laskentajakson pituuden ja jäännösarvon valintaan liittyviä perusteita on käsitelty edellisissä kappaleissa, joten niitä ei käsitellä tarkemmin tässä. Tässä kohtaa esitetään lähinnä laskelmissa tehdyt oletamat ja tarvittaessa lyhyt perustelu valinnalle.

- Tässä esimerkissä elinkaarikustannukset on diskontattu nykyarvoon käyttäen 4 % laskentakorkoa.
- Rakenteen elinkaaren tarkastelujakson pituudeksi on valittu 50 vuotta.
- Pohjarakenteiden rakentamis- ja korjauskustannuslaskelmat perustuvat tyyppipoikkileikkauksista mitattuihin materiaali- ja työmenekkeihin sekä valittuihin yksikköhintoihin. Koska materiaalien etenkin penger- ja kaivumassojen yksikköhinnat vaihtelevat voimakkaasti esimerkiksi kuljetusmatkojen pituuksien tai rakennuskohteen suuruuden mukaan tulisi tämä ottaa huomioon tarkasti oikeaa urakkalaskentaa suoritettaessa. Esimerkissä ei ole kuitenkaan otettu kantaa työn suuruuteen tai kuljetusmatkoihin sen enempää kuin se on ollut välttämättömyyttä. Yksikköhintoina on käytetty Tiehallinnon www-sivulta löytyvää yksikköhintaluetteloa pohjarakenteille ja näiden keskimääräisiä arvoja. Käytetyt yksikköhinnat edustavat tavanomaista keskiarvoa ja antavat siten realistisen kuvan erilaisten pohjarakennusratkaisujen kustannusten syntyisestä ja niiden suuruudesta. Esimerkkilaskelman kustannusarvioissa käytetyt yksikköhinnat on esitetty taulukossa 4.

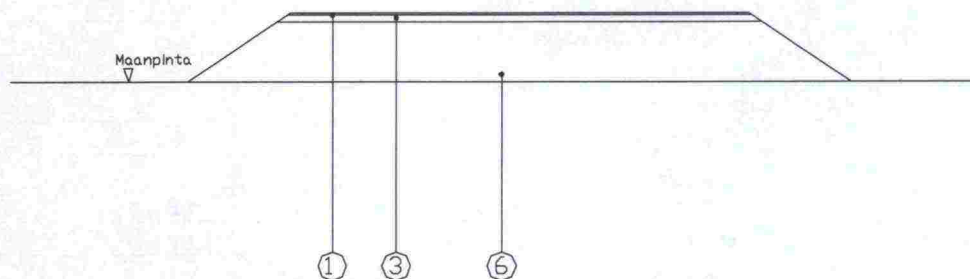
Taulukko 4. Esimerkkilaskelmissa käytetyt yksikköhinnat litteroineen.

Littera	toimenpide	yks.	€/yks.
1530	Asfaltin poisto	m ²	2
2100	Maaleikkaus	m ³	4
2210	Perusmaan poisto, kaivannon teko MVK	m ³	4
4130	Vastapenkereet	m ³	4
4110	Tiepenger	m ³	5
4120	Massanvaihdon täytöt	m ³	5
4180	Kevytsora (nykyinen materiaali)	m ³	5
4180	Kevytsora (uusi materiaali)	m ³	39
4410	Suodatinkerros	m ³	8
4430	Jakava kerros	m ³	9
4510	Sitomaton kantava kerros	m ³	12
5110	Sidottu kantava	m ²	5
5210	Asfalttobetoni 40mm kerros	m ²	6
6120	300mm*300mm teräsbetonipaalu	m	28
6120	300mm*300mm teräsbetonipaalu jatkaminen	kpl	86
6182	Paalulaatta	m ²	78
6211	Nauhapystyosat	m	1,2
6260	Syvästabilointipilarit	m	7

- Pohjarakenteiden kustannuksiin ei ole otettu mukaan varsinaisen penkereen täyttöjä ja rakennekerroksia, vaikka niidenkin määrät muuttuvat todellisuudessa jonkin verran pohjarakenteiden valinnan perusteella.
- Tien käyttäjän kustannuksien syntymistä korjauspäällystykseen yhteydessä on arvioitu lähteen 23 avulla ottaen huomioon muut esimerkiksi liittymät olettaen. Tässä esimerkissä on arvioitu, että tien käyttäjän kustannukset ovat noin 206 €/100 m tien uudelleen päällystämisen yhteydessä.
- Tarkasteltavan osuuden pituudeksi on otettu 500 m pitkä pohjasuhteiltaan samankaltainen tieosuus.

- Suuremman painumakorjauksen aikana liikenne joudutaan ohjaamaan kiertotielle. Tällöin korjaamiskustannukset nousevat jyrkästi, sillä korjauskohteen viereen joudutaan rakentamaan kiertotie, joka korjauksen jälkeen joudutaan vielä purkamaan. Esimerkissä on oletettu, että kiertotie rakennetaan korjausalueen viereen hieman normaalia tietä kapeampana eli n. 8,0m levyisenä ja se koostuu vain penkereestä, ohuesta kantavasta kerroksesta sekä yhteen kertaan tehtävästä päällystyksestä. Rakennekerrokset ovat siis tavallista ohuempia. Tämä antaa suuruusluokaltaan oikean kuvan minkälaisia kustannuksia tilapäisistä liikennejärjestelyistä saattaa syntyä. Todellisuudessa tilapäisten liikennejärjestelyjen kustannukset vaihtelevat tilapäisten liikennejärjestelmien rakentamiseen olemassa olevan tilan sekä muitten liikennereittien olemassaolon mukaisesti. Koska liikenteen siirtäminen tieverkolla huonompiasteiselle kiertotielle tai muun tilapäisen liikennejärjestelmän luominen saattaa aiheuttaa huomattavia kustannuksia joko rakentajalle tai tien käyttäjälle tulisi nämä ottaa elinkaarilaskelmissa huomioon. Tässä esimerkissä on liikennemäärän ja kiertotien pituuden perusteella on arvioitu, että kiertotiestä aiheutuu tien käyttäjän kustannuksia 0,10 €/ajon/vrk, jokaiselta vuorokaudelta, jonka liikenne on korjauksen takia siirretty kiertotielle. Kiertotien rakentamisesta ja purkamisesta aiheutuvat kustannukset on arvioitu kuvan 7 poikkileikkaukset perusteella.

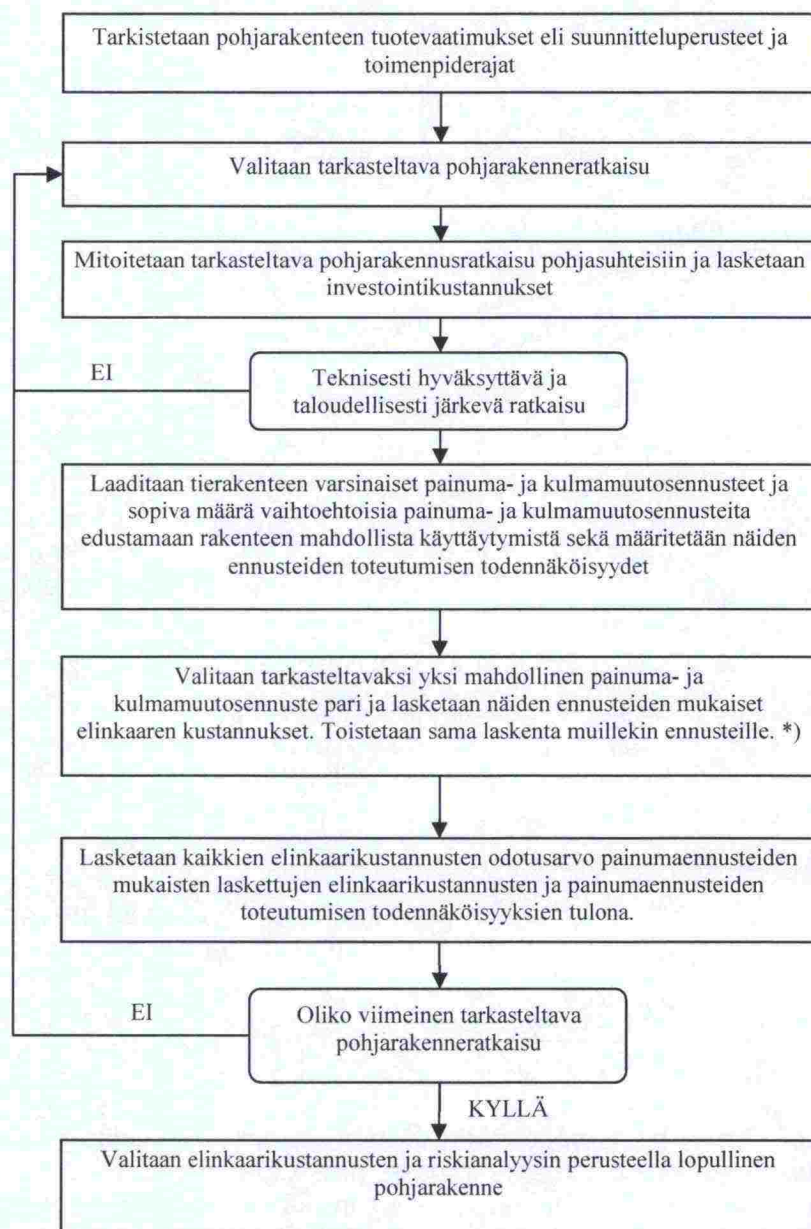
Nro	Nimitys	Paksuus
1	Kulutuspinna	40 mm
3	Sitomaton kantava	150mm
6	Penger	1310 mm
	Yhteensä	1500mm



Kuva 7. Korjausalueelle tehtävän kiertotien poikkileikkaus.

5.1.6 Tien pohjarakenteen valinta elinkaarikustannusten perusteella

Kuvassa 8 on esitetty laskentamenettely, jolla tämän selvityksen yhteydessä on määritetty tien pohjarakenteiden elinkaarikustannukset.

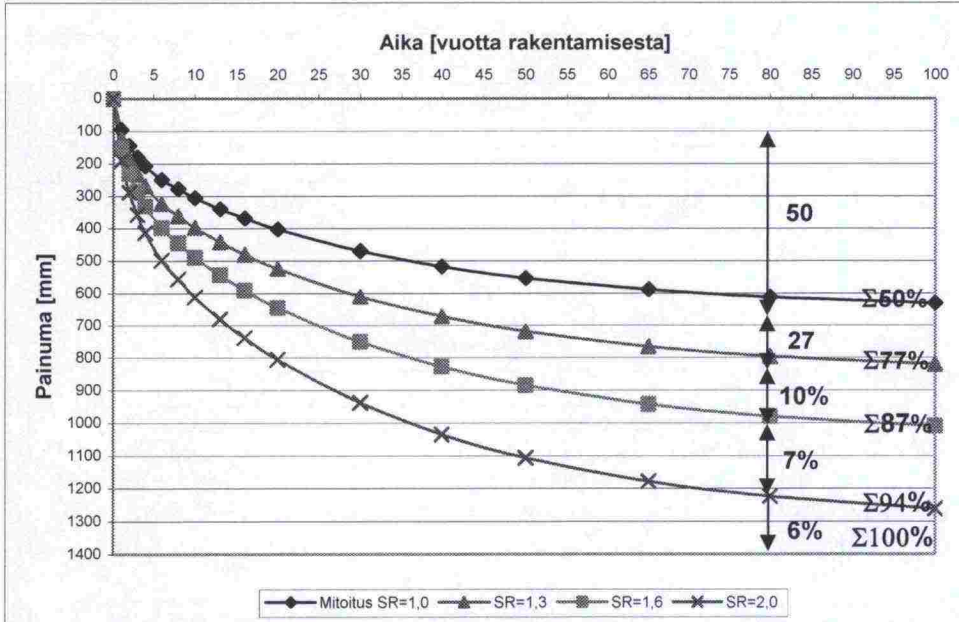


Kuva 8. Elinkaarilaskennan kulku pohjarakenteiden valinnassa.

*) Yksittäisestä painuma- tai kulmamuuotosennusteesta katsotaan ylittyvätkö toimenpideraja-arvot elinkaaren aikana. Tuloksena saadaan ajanhetket, jolloin ylitykset tapahtuvat sekä korjaustilannetta vastaavat painuma- ja kulmamuuotosilanteet, joiden mukaan korjaustoimet mitoitetaan. Korjaustoimenpiteen määrittämisen jälkeen määritetään toimenpiteestä aiheutuvat tien pitäjän ja tien käyttäjän kustannukset, jotka diskontataan nykyarvoon ja lasketaan yhteen.

5.2 Painumaennusteen epävarmuuden huomiointi elinkaarikustannusten laskennassa

Painumaennuste on laadittu käyttäen ohjelmaa "Tiepenkereen painuma", jolla voidaan laatia ennuste painuman suuruudesta ja sen ajallisesta kehitymisestä. Kuvassa 9 on painumaennuste maanvaraisen tiepenkereen keskikohdalla 100 vuotta rakentamisen jälkeen.



Kuva 9. Esimerkki tienpenkereen keskikohdan painumaennusteesta. Kuvaan on piirretty eri painuma-alueiden toteutumisen todennäköisyydet sekä summatut todennäköisyydet painumakäyrien kohdilla.

Tämän kappaleen esimerkeissä lyhenne SR tarkoittaa mahdollisen painuman ja todennäköisimmän painuman suhdetta, jota voidaan kuvata kaavalla 7 [1].

$$SR = \frac{\text{mahdollinen painuma}}{\text{todennäköisin painuma}} \quad (7)$$

Mahdollisella painumalla tarkoitetaan todennäköisyyslaskennan pohjalta saatavaa tiettyä painuman suuruutta, jonka toteutumiseen liittyy tietty todennäköisyys. Kaikki painumaennusteisiin liittyvät todennäköisyyksien arvot muodostavat yhdessä jatkuvan painuman todennäköisyyden tiheysfunktion, jonka ominaisuuksia voidaan merkitä kaavoilla 8-10.

$$f(x) \geq 0 \quad x \in R \quad (8)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1 \quad (9)$$

$$P[a \leq X \leq b] = \int_a^b f(x) dx \quad (10)$$

Todennäköisimmällä painumalla tarkoitetaan tässä esimerkissä mitoitustilanteessa saatavaa painumaennustetta, kun käytetään maastosta mitattuja tai muuten arvioituja keskimääräisiä painumaparametreja. Koska todennäköisin painuma on sama kuin ennustettu painuma ilmaisee termi SR mahdollisen painuman ja ennustetun painuman suhdetta. Siten kuvassa 9 käyrä $SR=1,0$ ilmaisee suoraan painumaennusteen mukaista painumakäyrää. Mahdollinen toteutuva painuma on tämän suuruinen tai pienempi 50 % todennäköisyydellä. Matemaattisesti tämä voidaan ilmaista seuraavasti.

$$P[0 \leq SR \leq 1,0] = \int_0^1 f(SR) dSR = 0,5 \quad (11)$$

Vastaavasti esimerkiksi $SR=1,3$ tarkoittaa painumaennustekäyrää, jossa toteutunut painuma ylittää ennustetun painuman 30 %. Kuvassa 9 esitetyt painumakäyrät on siis saatu suoraan kertomalla painumaennustetta vastaavat painuman arvot esitetyillä SR kertoimen arvoilla. Koska sivukaltevuuden muutokset syntyvät painumaerosta tiepenkereen keskikohdan ja reunaosien välillä, lisääntyvät sivukaltevuuden muutokset kokonaispainuman kasvun mukaisesti. Tämän vuoksi myös sivukaltevuuden muutoksia on arvioitu samoilla kertoimilla kuin penkereen kokonaispainumia. Sivukaltevuudenmuutuskäyrät eri tilanteissa on siis saatu kertomalla mitoitustilanteen mukainen sivukaltevuudenmuutuskäyrä eri tilanteita vastaavilla SR kertoimilla.

Konsolidaatiopainumaan liittyvät painumaennusteet perustuvat maailmalla yleensä kokoonpuristuvuusindeksiin käyttöön. Suomessa on kuitenkin laajasti käytössä tangenttimoduulimenetelmään perustuva painumamitoitus, jota on myös käytetty tämän esimerkin painumaennusteiden laadinnassa. Tangenttimoduulimenetelmässä painuman laskeminen perustuu kahteen muuttujaan moduulilukuun m ja jännitysekspONENTTIIN β . Kokoonpuristuvuusindeksimenetelmää käytettäessä painumaennuste perustuu kuitenkin vain yhteen muuttujaan C_c , mikä helpottaa tilastollisia tarkasteluja huomattavasti. Muun muassa tästä syystä painumaennusteiden tilastollisia tarkasteluja on tehty lähinnä kokoonpuristuvuusindeksiin perustuen.

Tässä esimerkissä esitetyt painumaennusteiden toteutumisen todennäköisyydet perustuvat kirjallisuudessa esitettyihin kokoonpuristuvuusindeksiin variaatiokertoimeen, jotka on määritetty eri puolilta maailmaa saaduista tutkimustuloksista. Kokoonpuristuvuusindeksiin suuruudeksi on esitetty arvoa 18-73 % ja standardiarvoksi on ehdotettu arvoa 30 %, jota on sovellettu myös tässä esimerkissä. Maaparametrien variaatiokertoimien on esitetty tarkemmin liitteessä [9]. Variaatiokerroin määritellään kaavalla 12 kahden eritoten käytetyn tilastollisen jakauman muotoa kuvaavien tunnusluvun varianssin ja keskiarvon avulla. Koska varianssi on kuvaa aineiston tilastollista jakauman muotoa keskiarvon ympärillä, kuvaa variaatiokerroin periaatteessa samaa asiaa. Variaatiokerroin poikkeaa varianssista kuitenkin siten, että se kuvaa hajontaa suhteellisenä ei absoluuttisena arvona, jolloin ilmiöistä saadaan enemmän vertailukelpoisia tuloksia. Varianssin ja keskiarvon laskenta ei tässä ole esitelty, sillä ne ovat peruskaavoja tilastomatematiikassa ja löytyvät kaikista perusoppaista.

$$CV = 100 \cdot \frac{s}{\bar{x}} \quad (12)$$

missä

CV = mitatun suureen variaatiokerroin

s = mitatun suureen keskihajonta

x = mitatun suureen keskiarvo

Kokoonpuristuvuusindeksin avulla painuma lasketaan kaavalla 13.

$$S = \frac{C_c}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'}{\sigma'_0} \cdot h \quad (13)$$

missä

S = ennustettu painuma

C_c = kokoonpuristuvuusindeksi

e_0 = alkuhuokosluku

σ' = jännitys kuorman lisäämisen jälkeen

σ'_0 = jännitys ennen kuorman lisäystä

h = kokoonpuristuvan kerroksen paksuus

Duncan [1] on esittänyt mallin konsolidaatiopainuman variaatiokertoimen laskemiseksi seuraavalla tavalla. Määritetään maakerroksen painumaan vaikuttavat painumaparametrit C_c , C_r , C_v ja σ_p sekä näiden parametrien keskihajonnat. Lasketaan painuma normaalisti kaavalla 13 edellä mainituilla parametreilla. Muutetaan yhden painumaparametrin arvoa ensin keskihajonnan verran suuremmaksi ja sitten yhden keskihajonnan verran pienemmäksi muiden painumaparametrien pysyessä muuttumattomina. Näin saadaan yhtä painumaparametria muuttamalla kaksi erilaista painumatulosta, jokaista tarkasteltavaa parametria kohti. Painumaennusteet muutetuilla parametrien arvoilla lasketaan kaavojen 14-15 mukaisesti.

$$S_{c1} = \frac{C_c + sd(C_c)}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'}{\sigma'_0} \cdot h \quad (14)$$

$$S_{c2} = \frac{C_c - sd(C_c)}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'}{\sigma'_0} \cdot h \quad (15)$$

missä

S_{c1} , S_{c2} = painumaennuste muutetulla parametrin arvolla

$sd(C_c)$ = kokoonpuristuvuusindeksin keskihajonta

Edellä lasketut painumatulokset vähennetään toisistaan, jolloin saadaan yhden parametrin aiheuttama painuman muutos kaavan 16 mukaisesti.

$$\Delta S_c = S_{c1} - S_{c2} \quad (16)$$

missä

ΔS_c = yhden painumaparametrin aiheuttama muutos painumaennusteeseen

Painuman keskihajonta saadaan kaavasta 17.

$$sd(S) = \sqrt{\Delta S_c^2 + \Delta S_r^2 + \Delta S_v^2 + \Delta S_p^2} \quad (17)$$

missä

$sd(S)$ = painuman keskihajonta

ΔS_c = kokoonpuristuvuusindeksin aiheuttama painuman muutos (normaalisti konsolidoitunut osa)

ΔS_r = kokoonpuristuvuusindeksin aiheuttama painumanmuutos (ylikonsolidoitunut osa)

ΔS_v = konsolidaatiokertoimen aiheuttama painuman muutos tietyllä hetkellä

ΔS_p = esikonsolidaatiojännityksen aiheuttama painuman muutos

Painuman variaatiokerroin voidaan laskea kaavalla 18.

$$CV_s = \frac{sd(S)}{S} \quad (18)$$

missä

CV_s = painuman variaatiokerroin

$sd(s)$ = painuman keskihajonta

S = ennustettu painuma

Esimerkkilaskelmassa on jätetty huomioimatta muut painumatekijät kokoonpuristuvuusindeksiä lukuun ottamatta, jolloin päästään vielä kuitenkin melko hyvään tarkkuuteen painuman keskihajontaa arvioitaessa. Liitteessä 2 on esitetty painuman variaatiokertoimen määrittäminen lähtien olettamasta, että kokoonpuristuvuusindeksin variaatiokertoimeksi CV_{cc} on valittu 30 %. Tässä esitetään vain saatu tulos eli painuman variaatiokertoimen CV_s arvoksi edellisellä olettamalla saatu 60 %.

Taulukossa 5 on esitetty erilaisia painumia sekä niihin liittyviä todennäköisyyksiä, että painumat ovat suurempia kuin ennustetut painumat. [1]

Taulukko 5. Todennäköisyydet, että todelliset painuma ovat ennustettuja painumia suurempia logaritmiseen normaalijakaumaan perustuen. [1]

SR	Coefficient of Variation of Settlement (V_s)											
	5%	10%	15%	20%	25%	30%	40%	50%	60%	67%*	70%	80%
1.10	3%	16%	24%	28%	30%	32%	33%	33%	33%	32%	32%	31%
1.20	0%	3%	10%	15%	19%	22%	25%	27%	27%	27%	27%	27%
1.30	0%	0%	3%	8%	12%	15%	19%	21%	23%	23%	23%	23%
1.40	0%	0%	1%	4%	7%	10%	14%	17%	19%	20%	20%	20%
1.50	0%	0%	0%	2%	4%	6%	11%	14%	16%	17%	17%	18%
1.60	0%	0%	0%	1%	2%	4%	8%	11%	13%	14%	14%	15%
1.70	0%	0%	0%	0%	1%	3%	6%	9%	11%	12%	12%	13%
1.80	0%	0%	0%	0%	1%	2%	4%	7%	9%	10%	11%	12%
1.90	0%	0%	0%	0%	0%	1%	3%	6%	8%	9%	9%	10%
2.00	0%	0%	0%	0%	0%	1%	2%	4%	6%	7%	8%	9%
2.20	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	3%	4%	5%	6%	7%
2.50	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	1%	3%	4%	4%	5%
3.00	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	1%	2%	2%	3%

Note: SR = Settlement Ratio = Possible Settlement/Most Likely Settlement.

*Settlement of foundations on sand and gravel, computed using the method of Burland and Burbridge (1985), or Terzaghi et al. (1996), has a coefficient of variation of 67%.

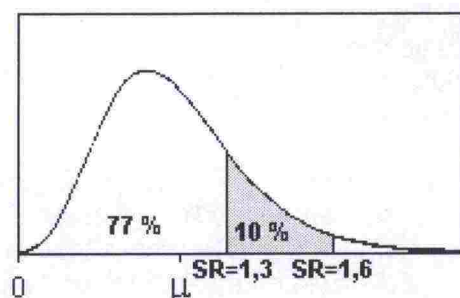
Kaavaa 18 soveltaen saadaan eri painumaväleille taulukossa 6 esitetyt toteutumisen todennäköisyydet. Kuvassa 10 on esitetty todennäköisyyksien liittyminen painumaennustekäyriin. Tässä tekstissä ei esitetä logaritmisien normaalijakauman laskentaa tai laskentakaavoja, vaan taulukossa esitetyt arvot on käytetty suoraan myöhemmissä laskelmissa. Edellä mainitun jakauman laskentakaavat löytyvät todennäköisyystieteen oppikirjoista.

Taulukko 6. Eri painumakäyrien toteutumisten todennäköisyydet.

SR	Todennäköisyys	Σ Todennäköisyys
0-1,0	$100\%-50\%=50\%$	50%
1,0-1,3	$100\%-23\%-50\%=27\%$	77%
1,3-1,6	$100\%-13\%-(50\%+27\%)=10\%$	87%
1,6-2,0	$100\%-(50\%+27\%+10\%)=13\%$ *)	100%

*) Väliin SR=1,6-2,0 on lisätty myös todennäköisyydet SR>2,0.

Kuvassa 10 on esitetty logaritmisien normaalijakauman todennäköisyysjakauman tiheysfunktion yleismuoto. Kuvaajaan on sovitettu muutamia SR-arvoja yllä esitettyjen todennäköisyyskäsitteiden selkeyttämiseksi.



Kuva 10. Logaritmisien normaalijakauman tiheysfunktion kuvaajan periaatteellinen muoto sekä SR-arvojen todennäköisyydet asetettuna kuvaan painuman variaatiokertoimella $V_s=60\%$. (Kuvaajan muoto epätarkka) Valkoisessa osassa todennäköisyys tarkoittaa väliä SR=0-1,3 ja harmaassa osassa väliä SR=1,3-1,6.

Tässä on syytä huomauttaa, että painumaväliin SR=1,6-2,0 on muista arvoista poiketen mukaan myös todennäköisyydet että SR>2,0. Tämä on tehty sillä perusteella, että maksimi painumaksi korjaustoimenpiteiden mitoittamisen yhteydessä on haluttu rajoittaa painuma, joka toteutuu n. 95 % todennäköisyydellä. Taulukosta 6 nähdään, että toteutuva painuma jää 94 % prosentin todennäköisyydellä alle kaksi kertaa ennustetun. Täten arvoa SR=2,0 voidaan pitää haluttuna maksimi painuman raja-arvona. Koska todennäköisyyksien summan kuitenkin tulee aina olla kaavan 9 mukaisesti 1, on SR>2,0 painumatilanteiden todennäköisyydet lisätty edelliseen väliin, jolloin ne edustavat korjaustoimenpiteiden suunnittelussa huonointa painumatilannetta. Tämä pienentää hieman kaikkein epätodennäköisimpien painumatilanteiden vaikutusta elinkaarikustannusten laskennassa.

Tämän esimerkkilaskelman yhteydessä painumakorjauksien suuruudet ja ajoittumiset on mitoitettu esitettyjen painumakäyrien suuremman SR arvon kohdalla, kun taas todennäköisyydet on laskettu taulukon 6 mukaisesti painumakäyrien väliltä. Tämä toisin sanoen lisää korjaustoimenpiteistä aiheutuvia kustannuksia suurempien painumakäyrien suuntaan. Esimerkiksi tilanne jossa SR=0,85 aiheuttaisi todellisuudessa pienemmän korjaustarpeen kuin jos SR=1,0. Korjaustoimenpiteet on kuitenkin myös tässä tapauksessa laskettu SR=1,0 mukaisesti. Edellä esitetyt valinnat kumoavat osittain toistensa vaikutuksia kustannuslaskennan yhteydessä, joten tässä syntyvät epätarkkuudet jäävät hyväksyttävälle tasolle muiden laskennassa tehdyistä oletuksista syntyviin virheisiin verrattuna.

Kun mahdollisille painumaennusteille on laskettu niiden elinkaarien aikana syntyvien kustannusten nykyarvot sekä määritetty näihin painumaennuste-

käyrien toteutumiseen liittyvät todennäköisyydet, saadaan tietyn ratkaisun elinkaarikustannusten odotusarvo laskettua mahdollisten painumaennusteisiin liittyvien kustannusten ja painumaennusteen toteutumisen todennäköisyyksien tulona kaavan 19 mukaisesti.

$$E[NPV] = \sum_i^n NPV_i \cdot p_i \quad (19)$$

missä

$E[NPV]$ = elinkaarikustannusten odotusarvo

NPV_i = painumaennusteen i mukaisten elinkaarikustannusten nykyarvo

p_i = painumaennusteen i toteutumisen todennäköisyys

5.3 Esimerkkilaskelmat

5.3.1 Yleistä esimerkkilaskelmista

Tämän kappaleen esimerkkilaskelmissa on tarkoituksena laskennallisesti vertailla esimerkkitapaukseksi valitun kohteen pohjaolosuhteissa kuutta erilaista pohjarakennusratkaisua sekä näistä ratkaisuista aiheutuva elinkaarikustannuksia. Esimerkkilaskennassa käytettävät pohjarakennustavat ovat seuraavat:

- esikuormitettu pengeri,
- kevennetty pengeri,
- pystyöjitetty pengeri,
- pilaristabilointi,
- pengeri-paalutus
- massanvaihto.

Kolme ensimmäistä vaihtoehtoa ovat maanvaraisia ja painuvia ratkaisuja. Kaksi viimeistä vaihtoehtoa ovat painumattomia tai lähes painumattomia rakenteita. Pilaristabilointi on kovaan pohjaan toteutettunakin hieman painuva rakenne, mutta painuminen on melko vähäistä, jossakin edellisten vaihtoehtojen välissä.

Kaikilla eri painumaennusteilla eli SR-arvoilla on erilaiset painumaparametrit, mutta eri ratkaisujen yhteydessä samat SR-arvot merkitsevät samoja painumaparametreja. Tarkemmin esimerkkikohteen pohjasuhteet ja painumaparametrit on esitetty omassa kappaleessaan edellä. Tässä kappaleessa on esitetty yhtä painumaennustetta eli $SR=1,3$ arvoa vastaavan tilanteen mukaiset kustannukset eri pohjarakennusratkaisuilla. Muiden painumaennusteiden kustannuslaskentaa ja sekä mitoituksissa käytetyt parametrit on esitetty esimerkkikappaleen tiivistämiseksi liitteissä. Varsinaisia mitoituslaskelmia ei tämän esimerkkikappaleen yhteydessä ole esitetty.

5.3.2 Esikuormitettu pengeri

Mitoitusratkaisu

Maanvaraisen penkereen tapauksessa pengeri rakennetaan suoraan pohjaan varaan ilman pohjanvahvistusta. Ainoastaan lyhyt 3 kk esikuormitus aika rakentamisen alussa on käytössä. Ratkaisuksi on valittu 1,6 m korkea pengeri, joka painuu rakentamisen aikana n. 100 mm, joka on varattu rakenteen painumavaraksi. Vakavuus ei edellytä vielä vastapenkereitä ja painuma rakentamisen aikana juuri yhtä suuri kuin on painumavaraksi oletettu.

Investointikustannukset

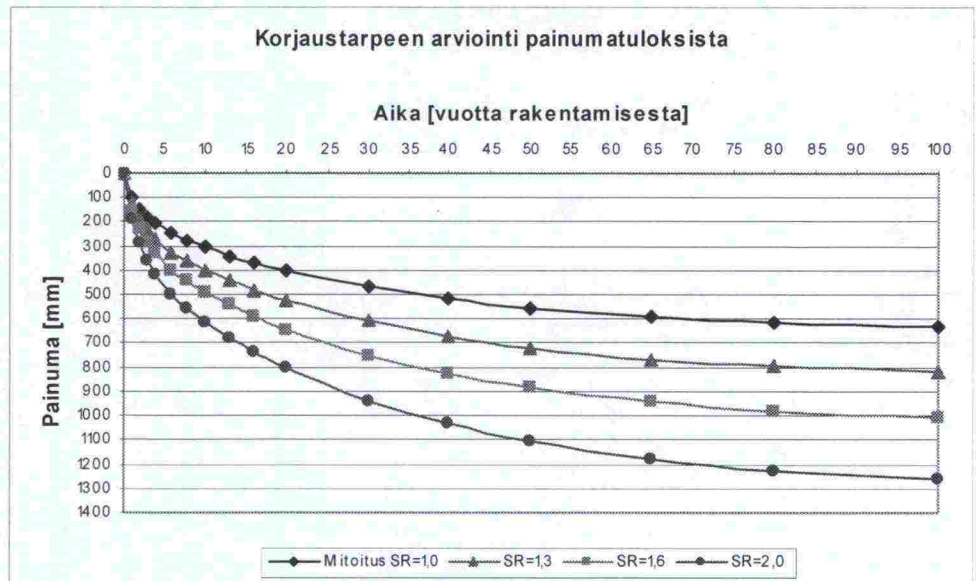
Investointikustannukset muodostuvat vain pienestä painumavarasta, joka rakentamisen yhteydessä on varattu penkereelle. Muu osa on varsinaista penkereeseen ja muuhun päällysrakenteeseen liittyvää rakentamista. Maanvaraisen penkereen investointilaskelma on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. Maanvaraisen penkereen pohjarakennusmäärät ja investointikustannukset/500 m.

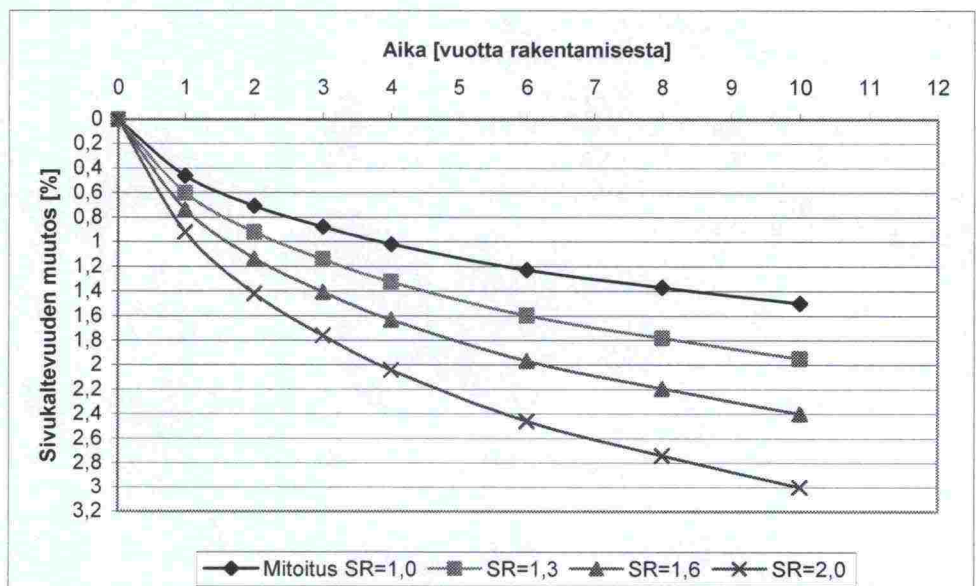
Määrä-laskenta	määrä	yks.	hinta/yks.	yks.	kustannus	yks.
Painumavara	750	m ³ tr	9	€/m ³	6750	€
Yhteensä					6 750	€

Ylläpitokustannukset

Ylläpitokustannusten määrittämiseksi on määritettävä rakenteelle kohdistettavat korjaustoimenpiteet sekä niiden ajoittuminen. Kuvassa 11 on esitetty penkereen painumakäyttäytyminen mitoitustilanteissa sekä muissa mahdollisissa tilanteissa 100 vuotta rakentamisen jälkeen. Tarkastelujakson pituus on kuitenkin vain 50 vuotta rakentamisesta lukien. Kuvasta 11 nähdään kuitenkin, että painumista tapahtuu myös yli 50 vuotta rakentamisen jälkeen. Vastaavasti tien sivukaltevuuden muutuskäyrät eri tilanteissa on esitetty kuvassa 12.



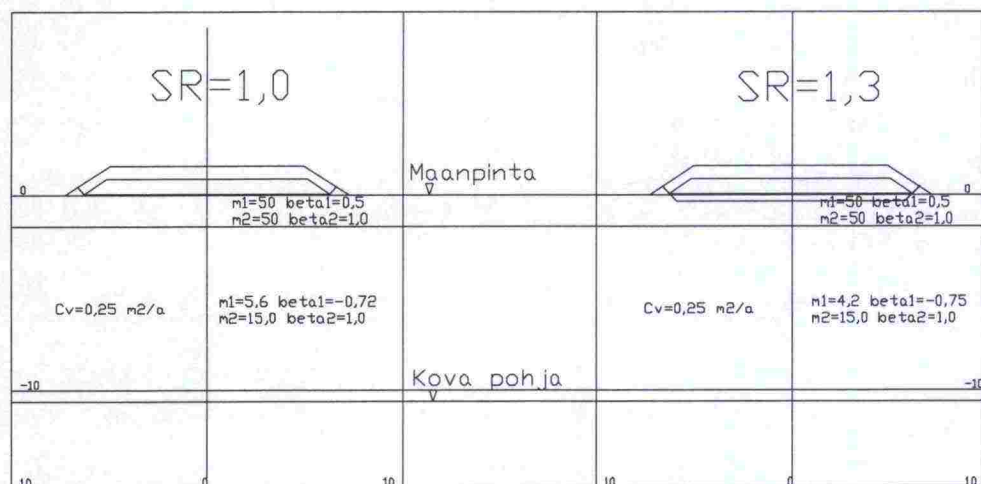
Kuva 11. Esikuormitetun penkereen arvioitu painumakäyttäytyminen 100 vuotta rakentamisen jälkeen.



Kuva 12 Esikuormitetun penkereen arvioidut sivukaltevuuden muutokset 10 vuotta rakentamisen jälkeen.

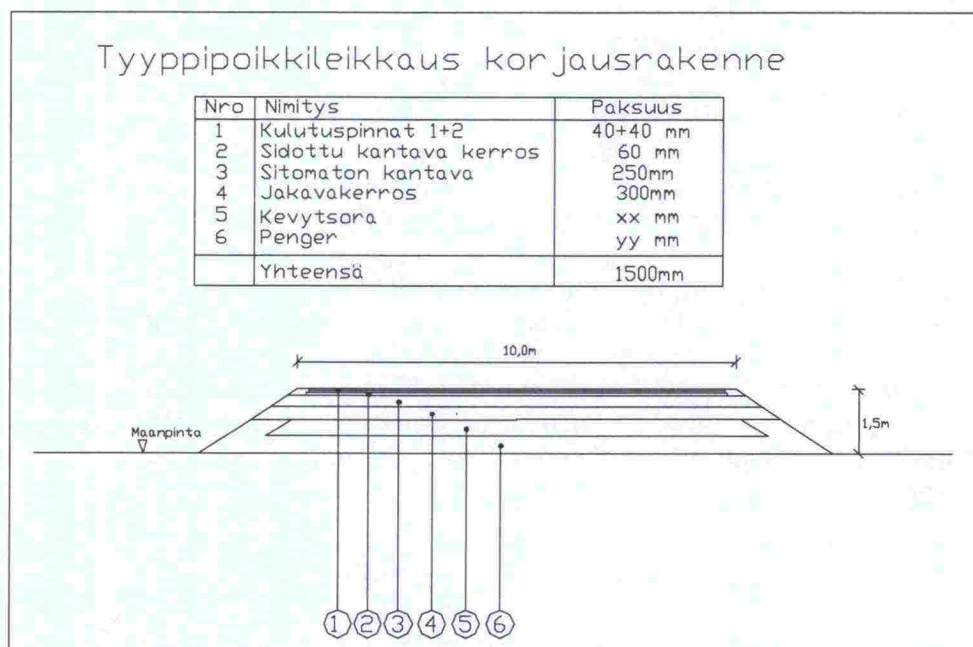
Ylläpitokustannukset on laskettu kaikille mahdollisille rakenteen painumaennusteilla eli SR-arvoille. Tässä esitetään vain esimerkki elinkaarikustannuslaskelmasta tilanteessa, jossa SR=1,3. Kuvasta 12 nähdään, että korjaustarvetta syntyy sivukaltevuuden osalta vuosina 1,4 ja 9. Vastaavasti painuman-

korjaustarve syntyy vuonna 18. Penkereen korottaminen 250 mm nostaa penkereen kokonaiskorkeuden 1,85 metriin. Tällainen penger vaatii 1100 mm paksun kevytsorakevennyksen, jolloin kokonaispainuma olisi 697 mm < 700 mm. Esiitetty kokonaispainuma 700 mm koostuu rakentamisen aikaisesta 100 mm painumasta, rakentamisen jälkeisestä 500 mm painumasta sekä korjauksen jälkeen sallitusta 100 mm painumasta. Korjausvaihtoehdon tyyppipoikkileikkaus on esitetty kuvassa 14. Vaikka kuvan 11 painumakäyrät on saatu kertomalla mitoituskäyrän arvot sopivilla SR kertoimella, on rakenteen mitoittamiseksi täytynyt määrittää uudet tangenttimoduulimenetelmän mukaiset painumaparametrit, joilla tienpenkereen painuma on käyrän $SR=1,3$ mukainen. Kevennysrakenteen mitoittaminen on sitten tehty näiden uusien painumaparametrien avulla.



Kuva 13. Esikuormitetun penkereen korjausrakenteiden poikkileikkaukset kun $SR=1,0$ tai $SR=1,3$.

Kuvasta 13 nähdään, että kuinka painumaparametrien huonontuminen lisää tarvittavan kevennyskerroksen paksuutta, jotta korjauksen jälkeinen painuma pysyisi halutuissa rajoissa. Laskelmissa ei ole huomioitu sivukaltevuuden korjaamisista aiheutunutta mahdollista maanpinnan nousua, toisaalta päällystäminen lisää painumia jota ei myöskään ole otettu huomioon laskelmissa. Vaikutukset umoavat osin toisiaan. Korjausrakenteen tyyppipoikkileikkaus on esitetty kuvassa 14.



Kuva 14. Korjausrakenteen tyypipoiikkileikkaus.

Korjaustoimenpiteen määrä- ja kustannuslaskenta on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8. Esikuormitetun penkereen painumakorjauksen määrä- ja kustannuslaskelma/500 m maanvaraisella penkereellä kun $SR=1,3$.

Määrälaskenta	määrä	yks.	hinta	yks.	kust.	yks.
Kiertotien pengerrys	7700	m3rtr	5	€/m3	38500	€
Kiertotien päällystys	3500	m2	6	€/m2	21000	€
Kiertotien purkaminen	7700	m2	4	€/m2	30800	€
asfaltin poisto	5000	m2	2	€/m2	10000	€
Penkereen yläosan poisto	10850	m3rtr	4	€/m3	43400	€
Kevytsora	6300	m3rtr	39	€/m3	245700	€
Penkereen yläosa rakentaminen	3250	m3rtr	10,5	€/m3	34125	€
Päällystäminen ABK+AB*2	9500	m2	17	€/m2	161500	€
Yhteensä					585 025	€

Sivukaltevuuden muutosten korjaamiseksi tehdään uudelleenpäällystys 9,5 metrin leveydeltä. Päällystämisestä aiheutuvat kustannukset on esitetty taulukossa 9.

Taulukko 9. Sivukaltevuuden korjaamisesta päällystämällä aiheutuvat kustannukset/500 m.

Määrälaskenta	pituus	yks.	leveys	yks.	ala	yks.	kust.	yks.
Päällystettävä alue	500	m	9,5	m	4750	m2	6	€/m2
Yhteensä	28500	€						

Tien käyttäjän kustannukset

Korjauspäällystyksen yhteydessä tien käyttäjän kustannukset ovat 206 €/100 m. Vastaavasti 500 m pitkän korjausalueen kustannukset ovat 1030 € jokaista päällystyskertaa kohti. Painumakorjausten yhteydessä joudutaan rakentamaan 500 m pitkä kiertotie, jonka kustannukset on laskettu edellä. Kiertotiestä aiheutuvat tien käyttäjän kustannukset on n. 0,1 €/ajon.

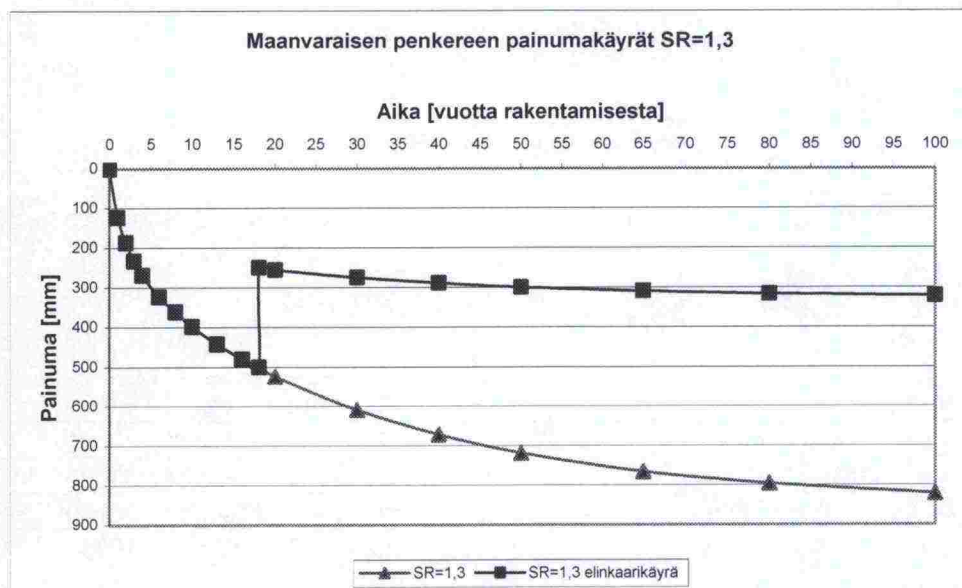
Tien käyttäjän kustannuksiksi saadaan siis $10000 \text{ ajon./vrk} \cdot 28 \text{ vrk} \cdot 0,1 \text{ €/ajon.} = 28000 \text{ €}$. Tässä korjauksen on oletettu kestävän neljä viikkoa.

Jäännösarvo

Maanvaraisen rakenteen jäännösarvoksi on tässä oletettu 70 % rakenteeseen asennetun kevytsoran arvosta. Muilla rakenteilla ei arvion mukaan ole jäännösarvoa lisäkorjaamisen tai muun toimenpiteen yhteydessä.

Elinkaaren kustannukset vaihtoehdolla SR=1,3

Kuvassa 15 on esitetty maanvaraisen penkereen SR=1,3 painumakäyrät, jotka selventävät elinkaaren kustannusten syntyä ja rakenteen elinkaaren mukaista käyttäytymistä. Taulukkoon 10 on koottu maanvaraisen penkereeseen elinkaaren aikana kohdistuvat toimenpiteet, toimenpiteiden ajoittuminen, -kustannukset sekä diskonttaustekijät ja kustannusten diskontattu nykyarvo.



Kuva 15. Esikuormitetun penkereen painumaennustekäyrä ja elinkaaren mukainen painumakäyrä kun SR=1,3.

Taulukko 10. Esikuormitetun penkereen painumaennusteen mukaiset kustannukset kun $SR=1,3$.

Toimenpidevuosi	Toimenpide/ kustannus	Kustannus [€]	Diskonttaus- tekijä	Diskonttatut kustannukset [€]
0	Investointi	6 750	1,00	6 750
1	Korjaus 1	28 500	0,96	27 404
1	Korjaus 1, tien käyttäjän kustannus	1 030	0,96	990
4	Korjaus 2	28 500	0,85	24 362
4	Korjaus 2, tien käyttäjän kustannus	1 030	0,85	880
9	Korjaus 3	28 500	0,70	20 024
9	Korjaus 3, tien käyttäjän kustannus	1 030	0,70	724
18	Korjaus 4	585 025	0,49	288 785
18	Korjaus 4, tien käyttäjän kustannus	28000	0,494	13 822
50	Jäännösarvo	-171 990	0,141	-24 201

Yhteensä

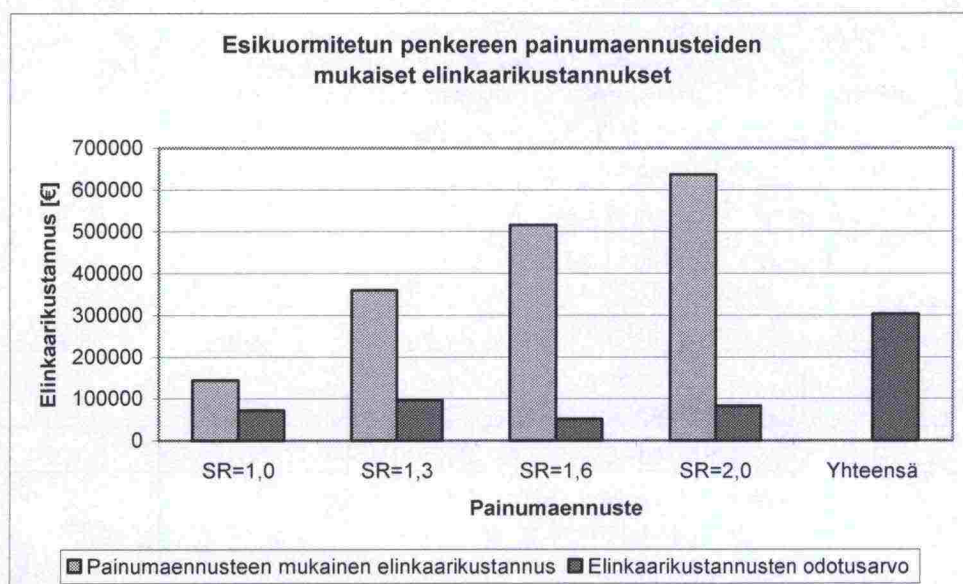
359 539

Taulukko 11. Kooste esikuormitetun penkereen elinkaaren kustannuksista.

Painumatilanne	Kustannus [€]	Tod. näköisyys [%]	Odotusarvo E(NPV) [€]
SR=1,0	144 311	50	72156
SR=1,3	359 539	27	97076
SR=1,6	515 631	10	51563
SR=2,0	636 144	13	82699
Yhteensä		100	303493

Taulukossa 11 on esitetty elinkaarikustannusten odotusarvon laskenta eri painumaennusteiden mukaisten elinkaarikustannusten ja niiden toteutumisten todennäköisyyksien tulona kaavan 19 mukaisesti. Elinkaarikustannusten odotusarvolla tarkoitetaan tässä selvityksessä kaikkien painumaennusteiden mukaista todennäköisyyksillä painotettua keskiarvoa ei yksittäiseen painumaennusteeseen liittyvää todennäköisintä kustannusta, joka saadaan kertomalla painumaennusteeseen liittyvä elinkaarikustannus ja painumaennusteen toteutumisen todennäköisyys.

Kuvasta 16 nähdään, että vaikka tiettyyn painumaennusteeseen liittyvät kustannukset nousevat rajusti toteutuvan painuman kasvaessa, saattaa saman painumaennusteen osuus elinkaarikustannusten odotusarvosta laskea. Näin tapahtuu, kun toteutuvan painuman todennäköisyys laskee suhteessa nopeammin kuin mitä painumaennusteen mukaiset elinkaarikustannukset kasvavat. Eri painumaennusteiden ja niihin liittyvien todennäköisyyksien vaikutus vaihtelee 17-32 %:iin lopullisesta odotusarvosta.



Kuva 16. Kooste esikuormitetun penkereen painumaennusteiden mukaisista elinkaarikustannuksista sekä elinkaarikustannusten odotusarvo.

5.3.3 Kevennetty penger

Mitoitusratkaisu

Kevennetty penger on toteutettu kevytsorarakkeena, siten että 30 vuoden kuluessa tapahtuva painuma on rajoitettu 350 mm:iin. Mitoituslaskelman perusteella kevennyspaksuudella 750 mm painuma on 341 mm 30 vuoden aikana.

Investointikustannukset

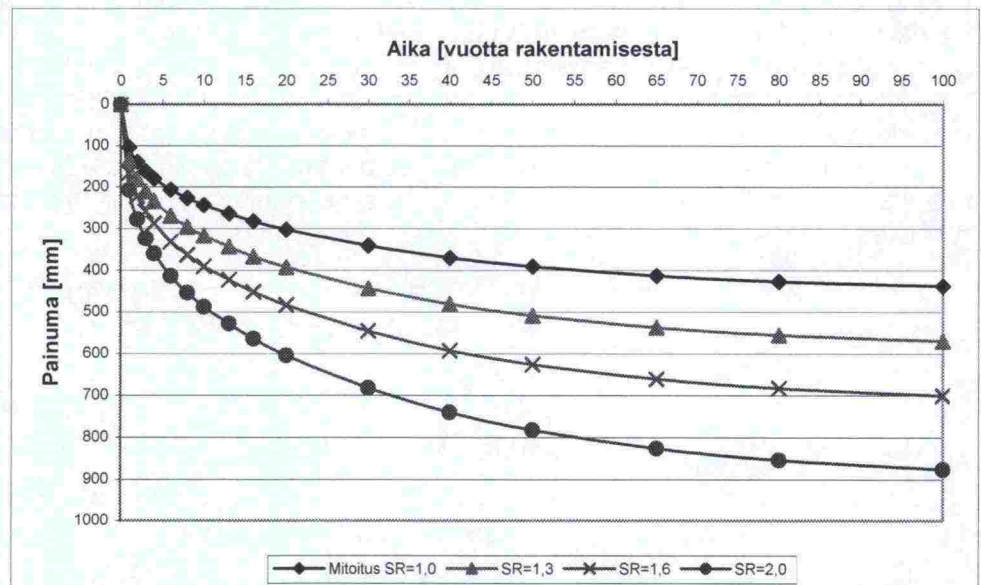
Investointikustannuksiin on laskettu vain tämän kevytsorakerroksen rakentamisesta aiheutuvat kustannukset. Muu osa liittyy varsinaisen penkereen rakentamiseen. Kevennetyn penkereen tyypipoikkileikkaus on samanlainen kuin maanvaraisen penkereen korjausrakenteen tyypipoikkileikkaus, joka on esitetty kuvassa 14. Kevennysrakenteen investointilaskelma on esitetty taulukossa 12.

Taulukko 12. Kevennetyn penkereen vaihtoehdon pohjarakennusmäärät ja kustannukset/500 m.

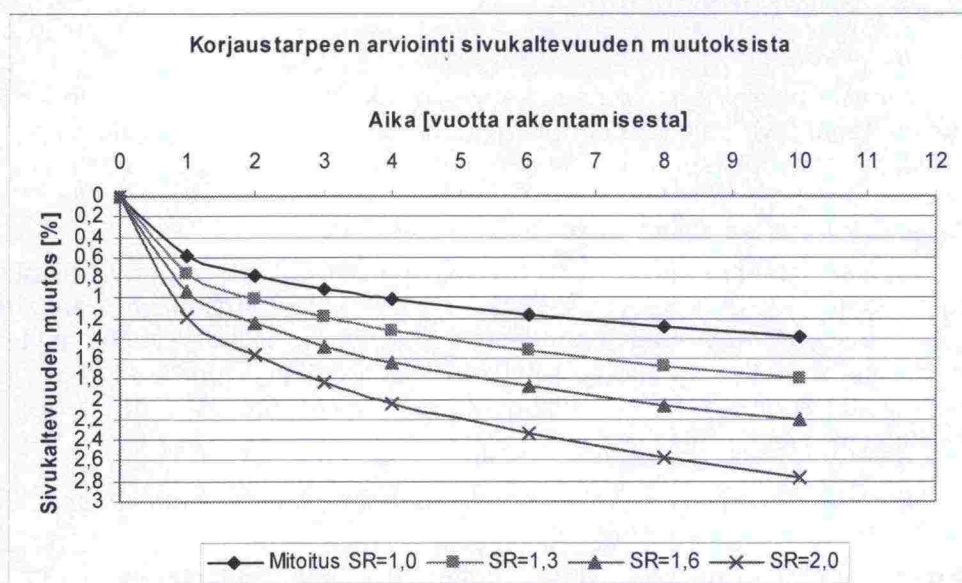
Määrälaskenta	määrä	yks.	hinta/yks.	yks.	kustannus	yks.
Kevytsora	4300	m	39	€/m	167700	€
Yhteensä					167 700	€

Ylläpitokustannukset

Kuvassa 17 on esitetty penkereen painumakäyttäytyminen mitoituslaitanteessa sekä muissa mahdollisissa tilanteissa 100 vuotta rakentamisen jälkeen. Kuvassa 18 on esitetty tien sivukaltevuuden muutoskäyrästä eri tilanteissa.

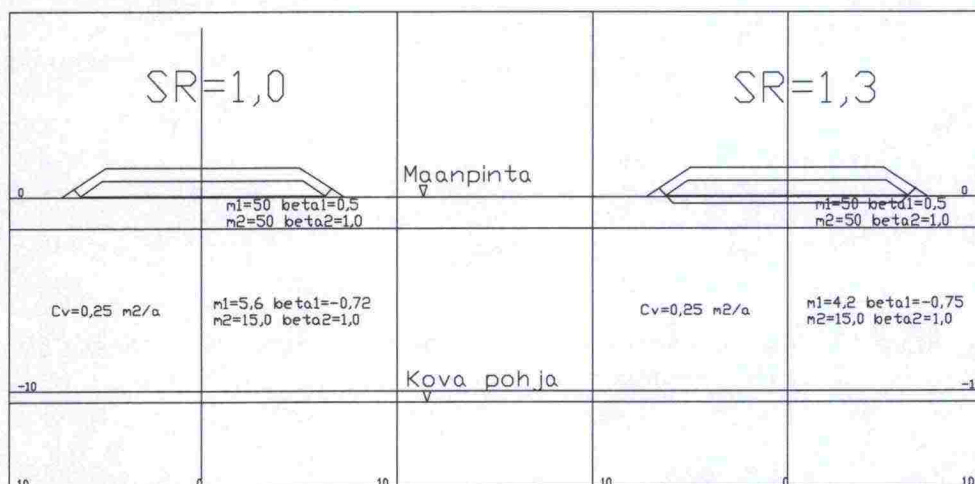


Kuva 17. Kevennetyn penkereen arvioitu painumakäyttäytyminen 100 vuotta rakentamisen jälkeen.



Kuva 18. Kevennetyn penkereen arvioitua sivukaltevuuden muutokset 10 vuotta rakentamisen jälkeen.

Ylläpitokustannukset on laskettu kaikille mahdollisille rakenteen painumaenusteille eli SR-arvoille, mutta tässä esitetään vain esimerkki laskelmasta tilanteesta, jossa $SR=1,3$. Kuvasta 18 nähdään, että korjaustarvetta syntyy sivukaltevuuden osalta vuosina 1, 3 ja 7. Vastaavasti painumankorjaustarve syntyy vuonna 47. Penkereen nostaminen 250 mm nostaa penkereen kokonaiskorkeuden 1,75 metriin, joka vaatii 1150 mm paksun kevytsorakevennyksen, jolloin kokonaispainuma olisi $584 \text{ mm} < 600 \text{ mm}$. Olemassa olevaa kevennysrakennetta joudutaan kasvattamaan 400 mm. Esitetty kokonaispainuma 600 mm koostuu rakentamisen jälkeisestä 500 mm painumasta sekä korjauksen jälkeen sallitusta 100 mm painumasta. Korjausvaihtoehdon tyyppipoikkileikkaus on sama kuin kuvan 14 mukainen varsinaisen rakenteen tyyppipoikkileikkaus siten, että kevennyksen paksuutta on lisätty. Vaihtoehtojen $SR=1,0$ sekä $SR=1,3$ mukaiset korjausrakenteiden poikkileikkaukset on esitetty kuvassa 19.



Kuva 19. Kevennetyn penkereen korjausrakenteiden poikkileikkaukset kun $SR=1,0$ tai $SR=1,3$.

Korjaustoimenpiteen määrä- ja kustannuslaskenta on esitetty taulukossa 13.

Taulukko 13. Painumakorjauksen määrä- ja kustannuslaskelma kevennetyllä penkereellä kun $SR=1,3$.

Määrälaskenta	määrä	yks.	hinta/yks.	yks.	kustannus	yks.
Kiertotien pengerrys	5000	m3rtr	5	€/m3	25000	€
Kiertotien päällystys	11100	m2	6	€/m2	66600	€
Kiertotien purkaminen	11100	m2	4	€/m2	44400	€
asfaltin poisto	5000	m2	2	€/m2	10000	€
Penkereen yläosan poisto	11100	m3rtr	4	€/m3	44400	€
Kevytsoran lisäys	2400	m3rtr	39	€/m3	93600	€
Kevytsoran uusiminen	4300	m3rtr	5	€/m3	21500	€
Pengertäytty	500	m3rtr	5	€/m3	2500	€
Penkereen yläosa rakentaminen	3250	m3rtr	10,5	€/m3	34125	€
Päällystäminen ABK+AB*2	9500	m2	17	€/m2	161500	€
Yhteensä					503 625	€

Sivukaltevuuden muutosten korjaamiseksi tehdään aivan samanlainen päällystystoimenpide kuin maanvaraisella vaihtoehdolla. Nämä kustannukset on esitetty taulukossa 9.

Tien käyttäjän kustannukset

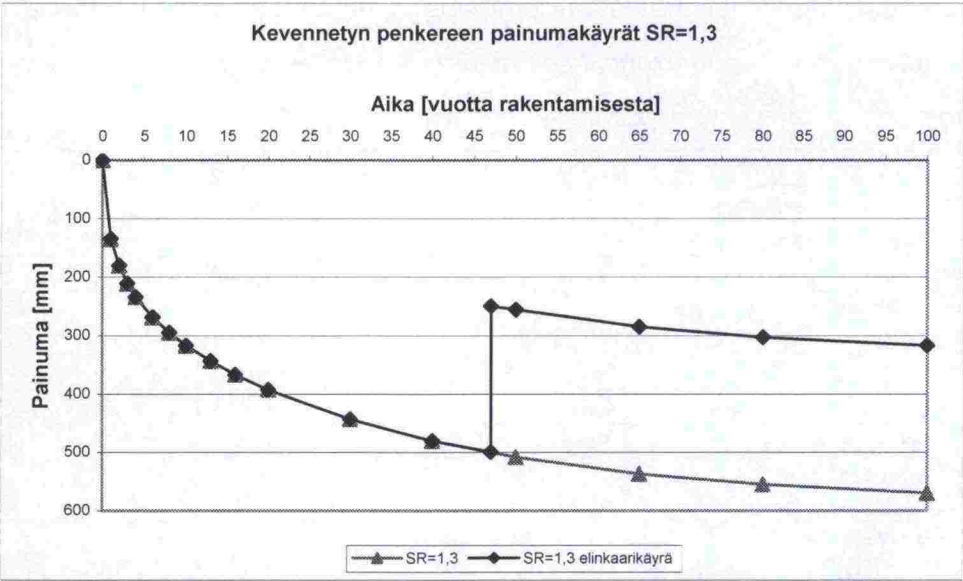
Tien käyttäjän kustannukset ovat samanlaiset kuin maanvaraisessa vaihtoehdossa ja niiden laskenta on esitetty kappaleessa 5.3.2.

Jäännösarvo

Maanvaraisen rakenteen jäännösarvoksi on tässä oletettu 70 % rakenteesseen asennetun kevytsoran arvosta. Muilla rakenteilla ei arvion mukaan ole jäännösarvoa lisäkorjaamisen tai muun toimenpiteen yhteydessä.

Elinkaaren kustannukset vaihtoehdolla $SR=1,3$

Taulukkoon 14 on koottu vaihtoehdon $SR=1,3$ elinkaaren kustannukset. Kuvassa 20 on esitetty kevennetyllä penkereellä $SR=1,3$ painumakäyrät, jotka selventävät elinkaaren kustannusten syntyä ja rakenteen elinkaaren mukaisista käyttäytymistä. Taulukkoon on 15 puolestaan koottu kevennetyllä penkereellä eri painumaennusteiden eli SR -arvojen mukaiset elinkaarikustannukset, painumaennusteen toteutumisen todennäköisyydet sekä elinkaarikustannusten odotusarvo.



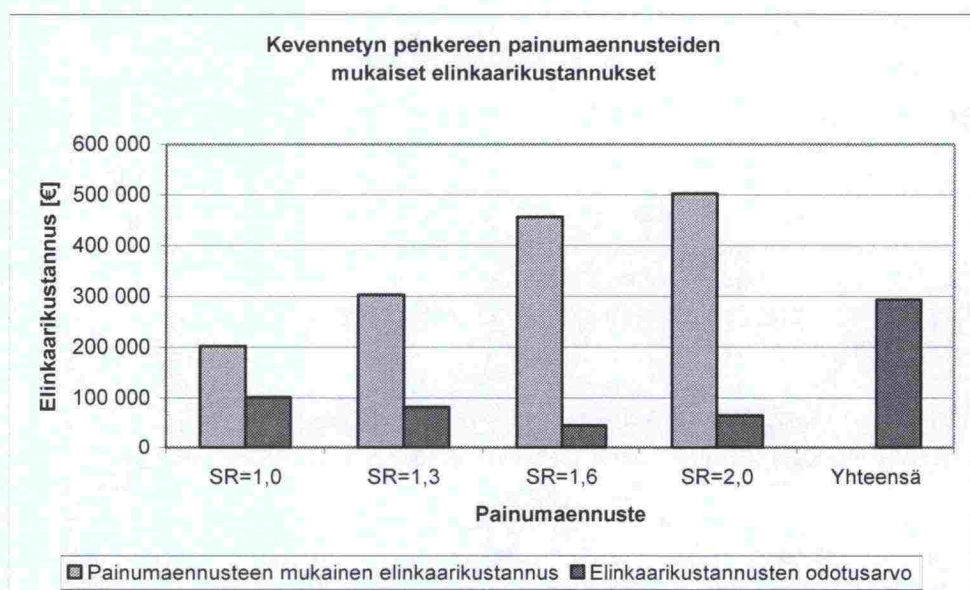
Kuva 20. Kevennetyn penkereen painumaennustekäyrä ja elinkaaren mukainen painumakäyrä kun SR=1,3.

Taulukko 14. Kevennetyn penkereen painumaennusteen mukaiset elinkaarikustannukset kun SR=1,3.

Toimenpidevuosi	Toimenpide-/kustannus	Kustannus	Disk.tekijä	Disk. kustannus
0	Investointi	167 700	1,00	167 700
1	Korjaus 1	28 500	0,96	27 404
1	Korjaus 1, tien käyttäjän kustannus	1 030	0,96	990
3	Korjaus 2	28 500	0,89	25 336
3	Korjaus 2, tien käyttäjän kustannus	1 030	0,89	916
7	Korjaus 3	28 500	0,76	21 658
7	Korjaus 3, tien käyttäjän kustannus.	1 030	0,76	783
47	Korjaus 4	503 625	0,16	79 715
47	Korjaus 4, tien käyttäjän kustannus	28000	0,158	4 432
50	Jäännösarvo	-182 910	0,141	-25 738
Yhteensä				303 196

Taulukko 15. Kooste kevennetyn penkereen elinkaaren kustannuksista eri tilanteissa.

Painuma-tilanne	Kustannus [€]	Tod. näköisyys [%]	Odotusarvo E(NPV) [€]
SR=1,0	202 016	50	101008
SR=1,3	303 196	27	81863
SR=1,6	456 890	10	45689
SR=2,0	502 283	13	65297
		Yhteensä	293857



Kuva 21. Kooste kevennetyn penkereen painumaennusteiden mukaisista elinkaarikustannuksista sekä elinkaarikustannusten odotusarvo.

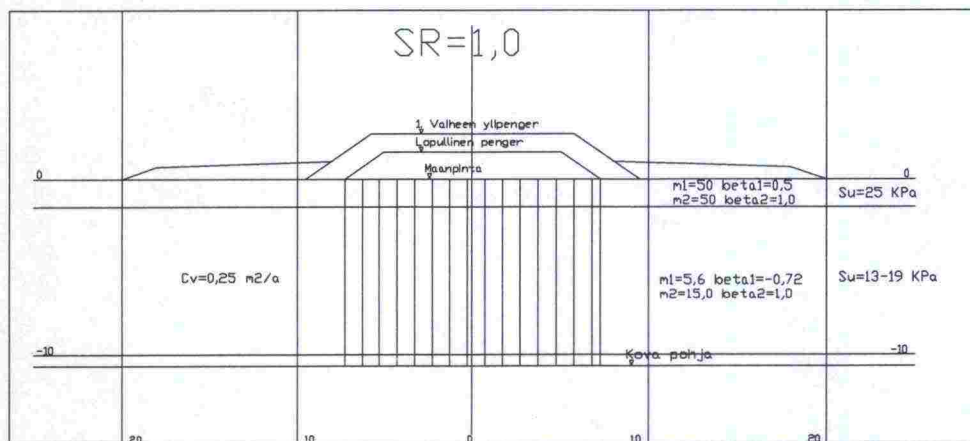
5.3.4 Pystyöjitettu penger

Mitoitusratkaisu

Pystyöjitus suoritetaan käyttäen 1,0 metrin ylipengertä, joka sisältää myös painumavarauksen. Korkeudeltaan 2,5 metrin penger vaatii kuitenkin vakavuuden varmuuskertoimella 1,5 vastapenkereet, jotka ovat 10 m pitkät ja 1,0 m korkeat. Kun oletetaan, että esikuormitusaikaa on käytettävissä 18 kk, saadaan pystyöjaväliksi $k/k=1,05$ m, kun pystyöjat sijoitetaan kolmioverkkoon. Pystyöjitetävän alueen leveys on sama kuin penkereen leveys n. 14,5 metriä. Pystyöjat ulotetaan kovaan pohjaan, jolloin pystyöjan pituus on 10,8 m sisältäen katkaisuvälin 0,2 m.

Investointikustannukset

Investointikustannukset muodostuvat pystyöjista sekä pystyöjituksen vaatimista massatöistä, kuten painumavarasta ja ylipenkereestä, vastapenkereistä sekä mahdollisesta ylipenkereen poistosta. Mitoitustilanteen mukainen tien rakenteellinen poikkileikkaus on esitetty kuvassa 22. Pystyöjitetun penkereen rakentamiskustannukset on esitetty taulukossa 16.



Kuva 22 Pystyöjitusvaihtoehdon mitoitus-tilanteen rakennepoikkileikkaus SR=1,0.

Taulukko 16. Pystyöjitetun vaihtoehdon pohjarakennusmäärät ja kustannukset/ 500 m.

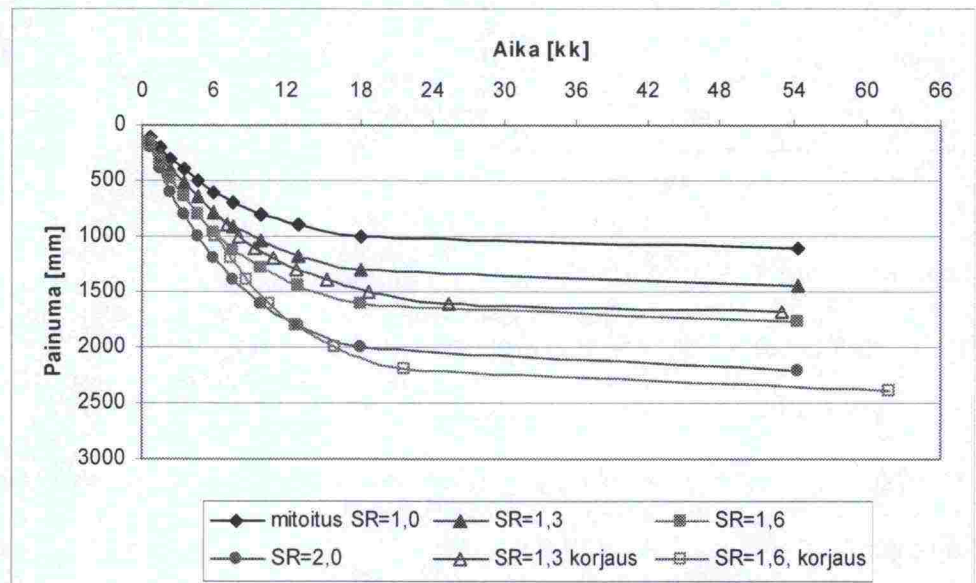
Määrälaskenta	määrä	yks.	hinta/yks.	yks.	kustannus	yks.
Pystyöjat	81540	m	1,2	€/m	97848	€
Painumavara+yp	9900	m3rtr	5,5	€/m3	54450	€
Vastapenger	8250	m3rtr	4	€/m3	33000	€
Ylipenkereen poisto	0	m3rtr	4	€/m3	0	€
Yhteensä					185 298	€

Ylläpitokustannukset

Kuvassa 23 on esitetty pystyöjitetun penkereen erilaiset painumakäyrästä 5,5 vuotta rakentamisen aloittamisesta. Koska painuma-aikaa on varattu 18 kk, saadaan rakentamisen jälkeiset painumat käyrien loppupäästä jättämällä pois 18 ensimmäistä kuukautta. Nähdään, että rakentamisen jälkeen missään vaihtoehdossa ei ylitä painumakorjauksen ehdoksi asetettu 500 mm painumaraja, joten rakentamisen jälkeen ei suuria painumakorjauksia joudu tekemään. Tässä oletetaan, että rakentamisen aikana on ennakoitu rakentamisen jälkeistä painumaa varautumalla päällystämään tien päällysrakenteen toinen sidottu kerros vasta noin vuoden kuluttua tien käyttöönnotosta.

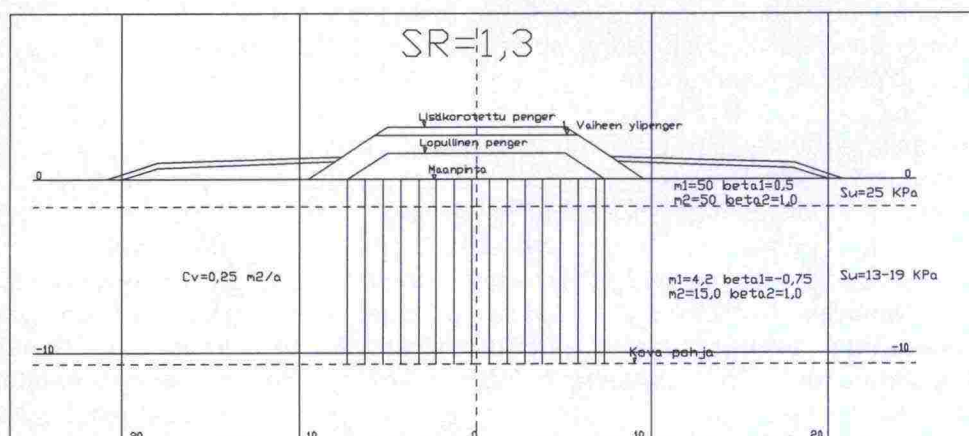
Tämän yhteydessä korjaantuvat pienet painumaerot sekä kaltevuudenmuutokset. Siten kaikki pystyjoitusvaihtoehdon pohjarakennuskustannukset syntyvät jo rakentamisen aikana.

Toisaalta ennustettujen painumaparametrien ylittyminen aiheuttaa painumaongelmia jo rakentamisen aikana sillä tällöin rakentamisen aikaiset ovat niin suuria, että poistettavaa ylipengertä ei ole rakentamisajan lopussa ollenkaan jäljellä vaan päinvastoin pengertä olisi korotettava lisää, mikä edelleen kiihdyttäisi painumaa. Tässä esimerkissä on oletettu, että painuman kehitystä seurataan rakentamisen aikana ja korjaustoimenpiteisiin ryhdytään siinä vaiheessa kun havaitaan, että painumat ovat ennakoitua suuremmat. Esimerkissä tämä tarkoittaa sitä, että painumakäyttäytyminen on saatu arvioitua 6 kk rakentamisen jälkeen, jolloin tehdään tarvittavat korjauspäätökset. Kahdessa ensimmäisessä tapauksessa korjaamiset on tehty korottamalla ylipengertä, tämä kuitenkin vaatii samalla vastapenkereiden korottamista ja leventämistä maan alhaisen leikkauslujuuden ansiosta. Korottamisen seurauksena painuma kiihtyy 6 kk kohdalla ja samalla kokonaispainuma kasvaa, mutta ei kuitenkaan ylitä ylipenkereen korkeutta. Kolmannessa tapauksessa vastapenkereet tulevat niin suuriksi, että korjaaminen tehdään keventämällä pengertä.



Kuva 23. Pystyjoitetun penkereen arvioitu painumakäyttäytyminen n. 5 vuotta rakentamisen aloittamisesta.

Tässä on esitetty korjaustoimenpiteet tilanteessa, kun $SR=1,3$. Kuvan 22 mukaisesti pengertä korotetaan 6 kk kohdalla 0,5 m, jolloin kokonaispengerkorkeus nousisi 3,0 metriin. Tämä vaatisi vastapenkereiden korottamista 1,3 metriin. Korjausrakenteen poikkileikkaus on esitetty kuvassa 24.



Kuva 24. Pystyojitetun rakenteen korjausrakenteen poikkileikkaus, kun $SR=1,3$.

Rakentamisen aikaisen korjaustoimenpiteen määrä- ja kustannuslaskenta on esitetty taulukossa 17 tilanteessa, kun $SR=1,3$.

Taulukko 17. Rakennusaikaisen korjaustoimenpiteen määrä- ja kustannuslaskelma pystyojitetulla penkereellä kun $SR=1,3$.

Määrälaskenta	määrä	yks.	hinta/yks.	yks.	kustannus	yks.
painumavara+yp	2700	m3rtr	9	€/m3	24300	€
vastapenger	3600	m3rtr	4	€/m3	14400	€
ylipenkereen poisto	0	m3rtr	4	€/m3	0	€
Yhteensä					38 700	€

Tien käyttäjän kustannukset

Poiketen muista vaihtoehtoista ei painumakorjauksesta aiheudu tien käyttäjän kustannuksia, koska korjaustoimenpiteet tehdään ennen tien käyttöönottoa, jolloin tie ei ole vielä liikenteen käytössä. Kustannuksia ei siten synny myöskään tilapäisistä liikennejärjestelyistä kiertoteineen.

Päällystekorjauksen yhteydessä syntyvät tien käyttäjän kustannukset ovat samat kuin muiden vaihtoehtojen päällystämisen yhteydessä syntyvät tien käyttäjän kustannukset eli 1030 €/500 m.

Jäännösarvo

Rakenteen jäännösarvoksi on oletettu tässä tapauksessa 0 %, sillä pystyji- en toiminnasta myöhemmin ei ole varmuutta, jos pengertä myöhemmin jou- dutaan korottamaan. Lisäksi painumakorjausten yhteydessä syntyvät pai- numat ovat suuria. Vaikeimman korjauksen yhteydessä tehdyn kevytsorake- vennyksen jäännösarvoksi on arvioitu 70 % kevytsoran hinnasta.

Elinkaaren kustannukset eri vaihtoehtoilla

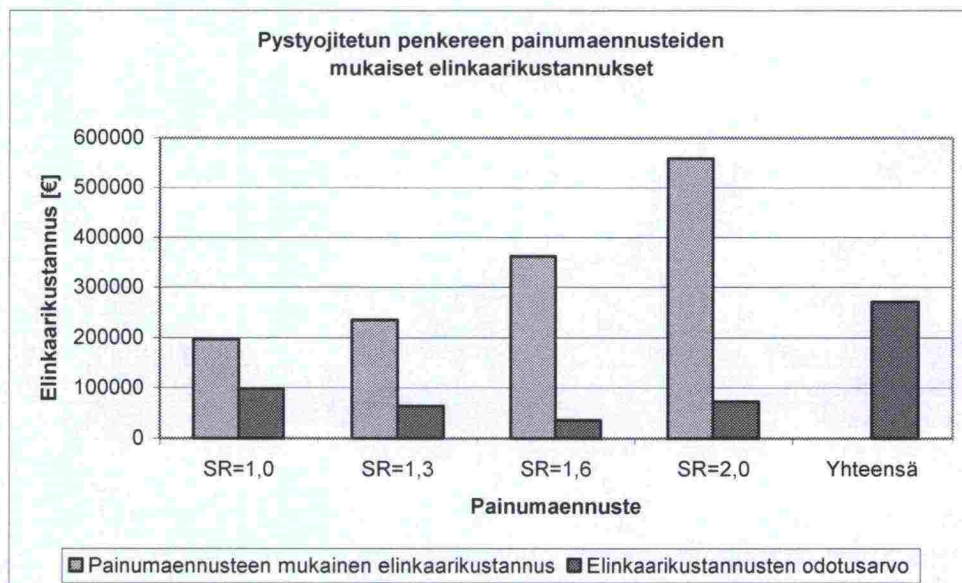
Taulukkoon 18 on koottu vaihtoehdon $SR=1,3$ elinkaaren kustannukset. Tau- lukkoon on 19 puolestaan koottu pystyojitetun penkereen eri painumaennus- teiden eli SR -arvojen mukaiset elinkaarikustannukset, painumaennusteiden toteutumisen todennäköisyydet sekä elinkaarikustannusten odotusarvo. Elinkaarilaskelmien yhteenveto on liitteessä 5.

Taulukko 18. Pystyöjitetun penkereen painumaennusteen mukaiset elinkaarikustannukset kun $SR=1,3$.

Toimenpidevuosi	Toimenpide-/kustannus	Kustannus	Disk.tekijä	Disk. kustannus
-1,5	Investointi	185 298	1,061	196526
0	Korjaus 1	38 700	1,000	38700
0	Korjaus1, käyttäjäkust.	0	1,000	0
50	Jäännösarvo	0	0,141	0
Yhteensä				235226

Taulukko 19. Kooste pystyöjitetun penkereen elinkaaren kustannuksista eri tilanteissa.

Painumatilanne	Kustannus [€]	Tod. näköisyys [%]	Odotusarvo E(NPV) [€]
SR=1,0	202 016	50	101008
SR=1,3	303 196	27	81863
SR=1,6	456 890	10	45689
SR=2,0	502 283	13	65297
Yhteensä			293857



Kuva 25. Kooste pystyöjitetun penkereen painumaennusteiden mukaisista elinkaarikustannuksista sekä elinkaarikustannusten odotusarvo.

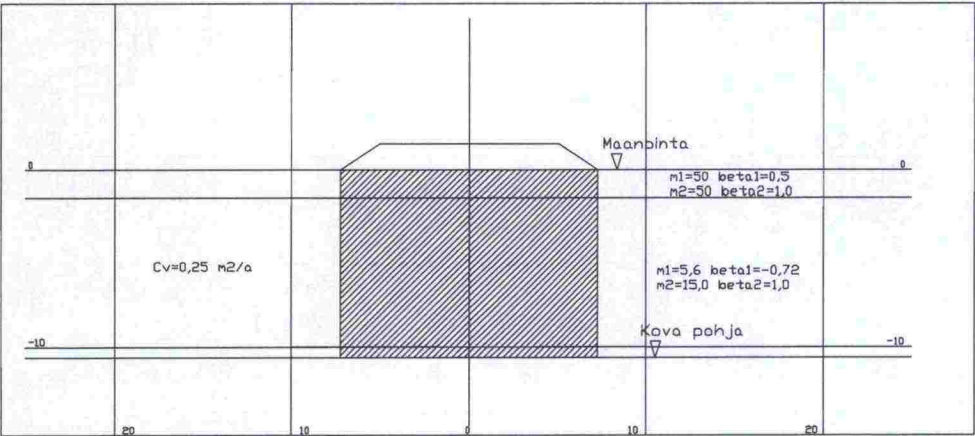
5.3.5 Pilaristabiloitu penger

Mitoitusratkaisu

Stabilointipilareiden halkaisijaksi on valittu 500 mm, jolloin pilariväliksi tulee k/k=1,35 m. Pilaristabiloitavan alueen leveys on 14,5 m, mikä vaatii 11 pilaria leveyssuunnassa ja 74,1 kpl pituussuunnassa 100 m kohti.

Investointikustannukset

Investointikustannukset muodostuvat pelkästään pilareiden rakentamisesta tienpenkereen alle. Kuvassa 26 on esitetty pilaristabiloidun penkereen periaatteellinen poikkileikkaus ja taulukossa 20 on vastaavasti ratkaisun määrä- ja kustannuslaskenta.



Kuva 26. Pilaristabiloidun penkereen poikkileikkaus.

Taulukko 20. Pilaristabiloidun penkereen pohjarakennusmäärät ja kustannukset.

Määrälaskenta	määrä	yks.	pituus	yks.	määrä	yks.
Stabilointipilarit	4075	kpl	10	m	40750	m
Määrälaskenta	määrä	yks.	hinta/yks.	yks.	kustannus	yks.
Stabilointipilarit	40750	m	7	€/m	285 250	€
Yhteensä					285 250	€

Ylläpitokustannukset

Pilaristabiloitujen penkereiden lopullista painumaa pengerkorkeuden mukaan on tutkittu mm. Ruotsissa [26], jossa on saatu tulokseksi, että alle kahden metrin penkereillä lopullinen painuma jää yleensä alle 100 mm. Mikä vastaa paljolti myös Suomessa saatuja kokemuksia. Ruotsissa pilarit tosin mitoitetaan yleensä myötäävinä pilareina toisin kuin Suomessa, jossa pilarit mitoitetaan kimmoisina pilareina. Edellisten tietojen pohjalta on arvioitu, että esimerkin mukaisen 1,5 m korkean pilaristabiloidun penkereen painuma tulee olemaan alle 100 mm. Vaikka esitetty painuma-arvio ylittäisikin on rakenteen korjausrajaan vielä pitkä matka. Käytännössä pilaristabiloidulla penkereellä ei voi syntyä yli 500 mm painumaa rakentamisen jälkeen, muutoin kuin käytettäessä määrämittäisiä pilareita, joiden alle jää kokoonpuristuva kerros. Toinen vaihtoehto olisi se, että rakentamisen aikana tapahtuu työvirheitä kuten pilareiden katkeamisia riittämättömän vakavuuden seurauksena, jolloin suuret painumat olisivat myös mahdollisia. Esimerkin tilanteessa pilarit uloteaan kuitenkin kovaan pohjaan asti ja oletetaan, että rakentaminen on suori-

tettu asianmukaisesti. Siten rakentamisen jälkeen ei oletettavasti synny korjaustarvetta eikä ylläpitokustannuksia.

Tien käyttäjän kustannukset

Koska korjaustarvetta ei synny, ei synny myöskään korjauksista aiheutuvia tien käyttäjän kustannuksia.

Jäännösarvo

Syvästabilointipilarien mahdollista heikkenemistä ajan mukana ei juurikaan tunneta ja niiden jäännösarvo perustuu suurelta osin tulevaisuuden rakentamistoimenpiteistä, joita ei tunneta. Tässä jäännösarvoksi on valittu n. 30 % pilareiden rakentamiskustannuksista.

Elinkaaren kustannukset eri vaihtoehdoilla

Taulukkoon 21 on koottu pilaristabiloidun penkereen elinkaaren kustannukset.

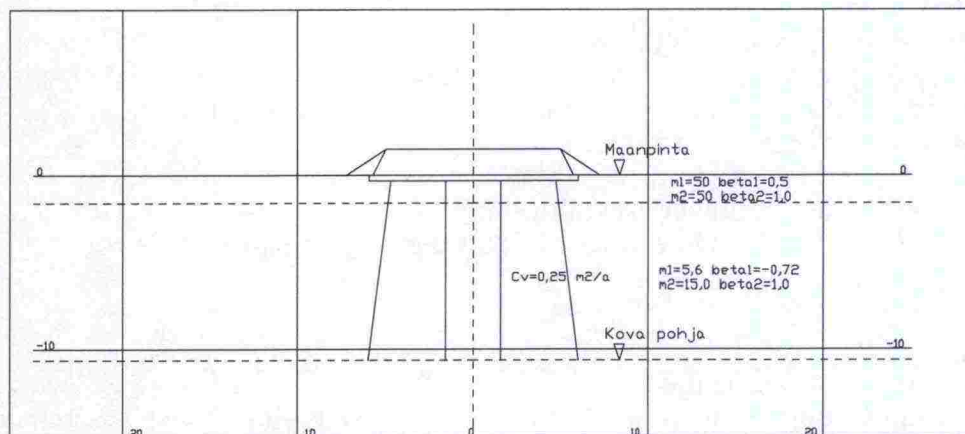
Taulukko 21. Pilaristabiloidun penkereen elinkaaren kustannukset.

Toimenpidevuosi	Toimenpide-/kustannus	Kustannus	Disk.tekijä	Disk. kustannus
0	Investointi	285 250	1,000	285250
50	Jäännösarvo	-85 575	0,141	-12041
Yhteensä				273209

5.3.6 Pengerpaalutuksen varaan rakennettu penger

Mitoitusratkaisu

Valitaan paaluksi 300 mm*300 mm teräsbetonipaalu, jolloin saadaan 1,5 m pengerkorkeudella paaluväliksi $k/k=3,15$ m. Laatan tarvittavaksi leveydeksi on mitattu 12,0 m ja laatan paksuudeksi on arvioitu n. 0,3 m. Valitun ratkaisun poikkileikkaus on esitetty kuvassa 27.



Kuva 27. Pengerpaalutuksen varaan rakennetun penkereen poikkileikkaus.

Investointikustannukset

Investointikustannukset muodostuvat paalulaatasta, paaluista sekä mahdollisista paalujen jatkoksista. Taulukossa 22 on esitetty pengerpaalutuksen määrä- ja kustannuslaskenta.

Taulukko 22. Pilaristabiloidun penkereen pohjarakennusmäärät ja kustannukset.

Määrälaskenta	määrä	yks.	pituus	yks.	määrä	yks.
Paalulaatta	12	m	500	m	6000	m2
paalut	10,2	m/kpl	636	kpl	6487	m2
Määrälaskenta	määrä	yks.	hinta/yks.	yks.	kustannus yht.	
Paalulaatta	6000	m2	78	€/m2	468000	€
Paalut (300mm*300mm)	6487	m	28	€/m	181642	€
Jatkokset (300mm*300mm)	0	kpl	86	€/kpl	0	€

Ylläpitokustannukset

Pengerpaalutuksen varaan rakennettu penger on laadultaan kaikkein korkein mitä tienrakentamisessa yleensä käytetään. Rakenne on painumaton ja onnistumisvarmuus on hyvä. Koska painumia ei synny, ei synny myöskään painumakorjaustarvetta eikä ylläpitokustannuksia.

Tien käyttäjän kustannukset

Koska korjaustarvetta ei synny, ei synny myöskään korjauksista aiheutuvia tien käyttäjän kustannuksia.

Jäännösarvo

Pengerpaalutusta käytetään etenkin korkeatasoisilla teillä, joilla liikenteen voidaan olettaa jatkuvan hyvinkin kauan. Pohjarakenteiden tekniseksi käyttöiäksi yleensä arvioidaan vähintään 100 v, joten 50 vuoden pitoajan jälkeen rakenteella on käyttöikää jäljellä vielä 50 vuotta. Tässä esimerkissä jäännösarvon oletetaan vähenevän teräsbetonirakenteiden osalta lineaarisesti. Jäännösarvoksi oletetaan tässä siten 50 % pengerpaalutuksen rakentamiskustannuksista.

Elinkaaren kustannukset eri vaihtoehtojilla

Taulukkoon 23 on koottu pengerpaalutuksen varaan perustetun penkereen elinkaaren kustannukset.

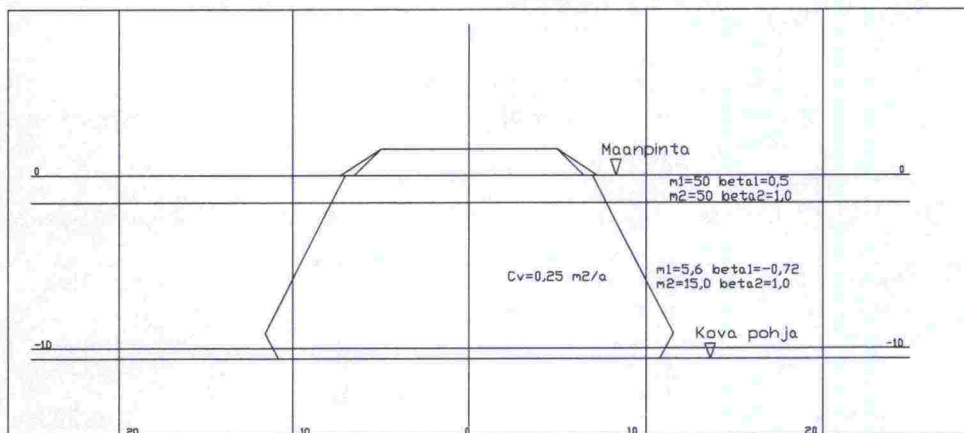
Taulukko 23. Pengerpaalutuksen varaan perustetun penkereen elinkaaren kustannukset.

Toimenpidevuosi	Toimenpidekustannus	Kustannus	Disk.tekijä	Disk. kustannus
0	Investointi	649 642	1,000	649642
50	Jäännösarvo	-324 821	0,141	-45706
Yhteensä				603935

5.3.7 Massanvaihdon varaan rakennettu pengerr

Mitoitusratkaisu

Osittaista massanvaihtoa ei ole järkevä, koska sen alle jäisi kokoonpuristuvia kerroksia, minkä vuoksi massanvaihto on toteutettu kovaan pohjaan asti. Koska kova pohja sijaitsee melko syvällä, on massanvaihto toteutettu pengertämällä eli pohjaantäyttönä kuvan 28 mukaisesti.



Kuva 28. Pengertämällä tehdyn massanvaihdon poikkileikkaus.

Investointikustannukset

Investointikustannukset muodostuvat massanvaihdon yhteydessä poistuvan maan poiskaivusta sekä tilalle tuotavan louheen/maan tuomisesta rakentamiseen. Taulukossa 24 on esitetty massanvaihdon määrä- ja kustannuslaskenta.

Taulukko 24. Pilaristabiloidun penkereen pohjarakennusmäärät ja kustannukset.

Määrälaskenta	määrä	yks.	pituus	yks.	tilavuus	yks.
Pehmeän perusmaan poisto	103800	m3rtr	4	€/m	415200	€
Maa/louhe tielinjalta rakentamiseen	103800	m3rtr	5	€/m3	519000	€
Yhteensä					934200	€

Ylläpitokustannukset

Kovaan pohjaan tehtyjen massanvaihdot ovat kokemusten perusteella lähes painumattomia rakenteita, joiden onnistumisvarmuus on hyvä. Koska painumat jäävät pieniksi ei painumakorjaustarvetta synny eikä sen vuoksi myöskään ylläpitokustannuksia pohjarakenteiden osalta.

Tien käyttäjän kustannukset

Koska korjaustarvetta ei synny, ei synny myöskään korjauksista aiheutuvia tien käyttäjän kustannuksia.

Jäännösarvo

Massanvaihto on erittäin pysyvä rakenne, joka ei käytännössä kulu eikä muutu ajan mukana. Massanvaihdon yhteydessä on myös rakenteen muokattavuus esimerkiksi penkereen korottaminen, levittäminen tms. tehtävissä melko helposti ja rakennetta voidaan usein hyödyntää siltään tien leven-

tämisen yhteydessä. Edellä esitettyjen seikkojen vuoksi massanvaihdon jäännösarvoksi on arvioitu 90 % rakenteen rakentamiskustannuksista.

Elinkaaren kustannukset eri vaihtoehtojilla

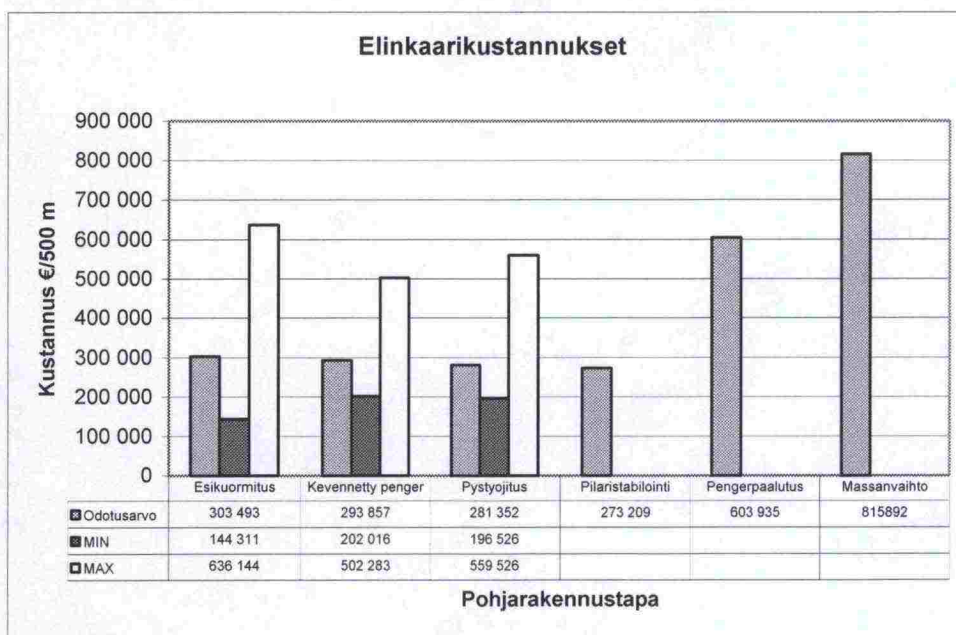
Taulukkoon 25 on koottu massanvaihdon varaan perustetun penkereen elinkaaren kustannukset.

Taulukko 25. Massanvaihdon varaan perustetun penkereen elinkaaren kustannukset.

Toimen- pidevuosi	Toimenpide/ kustannus	Kustannus	Disk.tekijä	Disk. kustannus
0	Investointi	934 200	1,000	934200
50	Jäännösarvo	-840 780	0,141	-118308
Yhteensä				815892

5.4 Yhteenveto pohjarakenteiden elinkaarikustannuksista

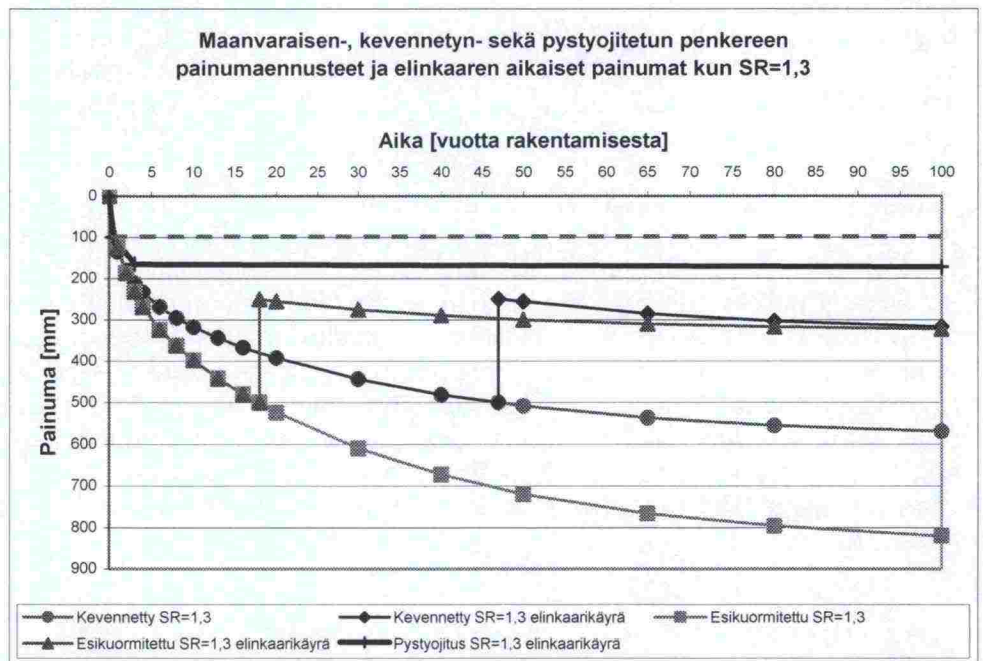
Kuvaan 29 on koottu eri pohjarakennusvaihtoehtojen elinkaarikustannukset esimerkkikohteessa. Minimiarvo esittää kustannuksia, jotka vastaavat tilannetta, jossa toteutuneet painumaparametrit vastaavat mitoituksessa käytettyjä. Tällöin painuma ja korjaustoimenpiteet jäävät mitoitetun suuruisiksi. Maksimiarvo ilmaisee noin 95 % todennäköisyydellä sen raja-arvon, jota elinkaaren kustannukset eivät ylitä. Tällöin painumaparametrit ovat huonoimmat mahdolliset, jotka mitoituksessa otetaan huomioon ja tätä huonommat ne ovat enintään 5 % todennäköisyydellä. Odotusarvo ilmaisee eri painumien todennäköisyyksillä painotetun kustannusten keskiarvon, jota voidaan pitää vertailun kannalta merkittävimpänä arvona vertailtaessa vaihtoehtoja keskenään. Pilaristabiloinnin, pengerpaalutuksen ja massanvaihdon osalta ei ole järkevää laskea minimi- ja maksimiarvoja, sillä näiden pohjarakennustapojen onnistumisvarmuus ei riipu niin merkittävästi pohjamaan ominaisuuksista kuin muiden pohjarakennustapojen. Tämä merkitsee sitä, ettei pohjamaan ominaisuuksien ennakoimaton vaihtelu painumaominaisuuksien suhteen aiheuta samankaltaista kustannusvaikutuksia kuin suoraan maanvaraan perustetuilla rakenteilla. Siten näiden menetelmien minimi- ja maksimi arvot ovat käytännössä melko lähellä odotusarvoa.



Kuva 29. Esimerkkilaskelmien mukaiset eri pohjarakennusvaihtoehtojen elinkaarikustannusten minimi-, maksimi- ja odotusarvot.

Edellä esitetystä voidaan myös päätellä, että minimi- ja maksimiarvojen erot ilmaisee itse asiassa riskiä, joka pohjarakenteen valintaan sisältyy. Esimerkiksi kuvassa 29 esikuormituksen minimiarvo on pienempi kuin kevennetyllä penkereellä, mutta toisaalta esikuormitetun penkereen maksimiarvo on suurempi kuin kevennetyllä penkereellä. Tämä tarkoittaa siis sitä, että esikuormituksella on pohjarakennusvalintana suurempi riski aiheuttaa yllätyksiä elinkaarikustannuksissa kuin kevennetyllä rakenteella, vaikka niiden kummankin odotusarvon mukaiset kustannukset ovat miltei yhtä suuret. Samoin pystyöjituksella voidaan katsoa olevan hieman enemmän riskiä kuin kevennetyllä rakenteella. Vaikka pilaristabiloinnin elinkaarikustannukset ovat miltei yhtä suuret kuin kevennetyllä- ja pystyöjitetulla penkereellä, voidaan ratkaisua pitää paljon näitä parempana, koska tällä ratkaisulla ei ole tämän esimerkin mukaan kustannusten muutosriskiä lainkaan.

Tarkastellaan asiaa vielä toiselta kannalta eli millainen on tien painumatilanne eri vaihtoehdoissa eri ajanhetkillä. Kuvassa 30 on esitetty maanvaraisen penkereen, kevennetyn penkereen sekä pystyojitetun penkereen painumatilanne sata vuotta rakentamisen jälkeen. Lisäksi kuvaan on piirretty pilaristabiloinnin painumarajaksi arvioitu maksimissaan 100 mm painumaa vastaava katkoviiva. Nähdään, että vaikka pystyöjitus saattaa huonoimmillaan tulla hieman kalliimmaksi kuin kevennetty penger on sen painuma rakentamisen jälkeen huomattavasti pienempi kuin kevennetyllä tai maanvaraisella penkereellä. Koska pystyöjituksen keskimääräiset kustannukset ovat lisäksi hieman pienemmät kuin kevennetyllä penkereellä voidaan pystyöjitusta pitää kevennettyä pengertä parempana ratkaisuna vaikka sen kustannusriski on hieman suurempi kuin kevennetyllä penkereellä. Koska pilaristabilointi on painumaltaan arviolta enintään puolet pystyöjitusvaihtoehdon painumasta, on tämä ratkaisu ylivertainen muihin verrattuna. Keskimääräinen kustannus jää muiden vaihtoehtojen alapuolelle samalla kun tien painuma on koko ajan pienempi kuin muissa vaihtoehdoissa. Toisaalta pengerpaalutusta voidaan vaihtoehtona pitää täysin painumattomana, joten sen laatu on vielä pilaristabilointiakin parempi. Tämän vaihtoehdon kustannukset kuitenkin selvästi pilaristabilointia kalliimmat, joten ratkaisuna se ei ole järkevä. Massanvaihto ei ole vaihtoehtona järkevä pehmeikön syvyyden vuoksi, koska massamäärät muodostuvat niin suuriksi, että vaihtoehdosta tulee erittäin kallis. Lisäksi massanvaihto pohjaantäyttönä ei ole täysin riskitön ja pieniä painumia saattaa rakenteessa esiintyä.



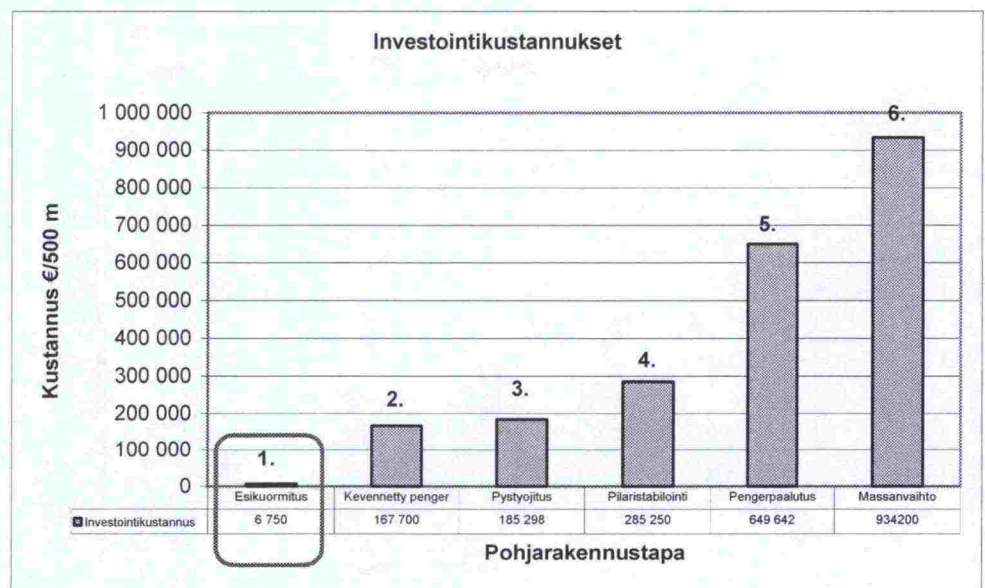
Kuva 30 Pohjarakennusvaihtoehtojen painumaennusteet sekä elinkaaren aikaiset painumat elinkaaret 100 vuotta rakentamisen jälkeen painumatilanteessa $SR=1,3$.

Maanvaraisen penkereen ja kevennetyn penkereen elinkaaren aikaisten painumaennusteiden vertailun tulos on mielenkiintoinen. Kevennetty rakenne on n. 17 vuotta selvästi parempi vaihtoehto, mutta maanvaraisen penkereen korjaamisen jälkeen tilanne vuoteen 47 asti täysin päinvastainen. Keskimäärin tie on siis paremmassa kunnossa maanvaraisen penkereen tapauksessa kuin kevennetyn penkereen tapauksessa. Toisaalta suurin osa painumakorjauksista ja sivukaltevuuden korjaustarpeesta syntyy ensimmäisen

kymmenen vuoden aikana kun painumanopeus eli käyrän kulmakerroin on suurimmillaan. Painumanopeudella on sikäli merkitystä, että tietä tullaan päällystämään normaalin kulumisen vuoksi noin kuuden vuoden välein, jolloin pienet epätasaisuudet korjaantuvat ilman merkittäviä lisäinvestointia pohjarakenteisiin. Siten pieni painumanopeus merkitsee sitä, että tie pysyy päällystyskertojen välissä paremmassa kunnossa kuin nopealla painumanopeudella. Suuri painumanopeus ilmenee tien suurempana epätasaisuutena päällystyskertojen välillä ja joissakin tapauksissa lisäpäällystyskertoina, mikäli normaali päällystysväli osoittautuu liian pitkäksi ja rakenteet vaativat paikaisia korjauksia. Näin tarkasteltuna aika, jonka kevennetyn penkereen painuma on suurempi kuin maanvaraisen penkereen painuma, ei ole saman arvoista kuin aika, jolloin kevennetyn penkereen painuma on pienempi.

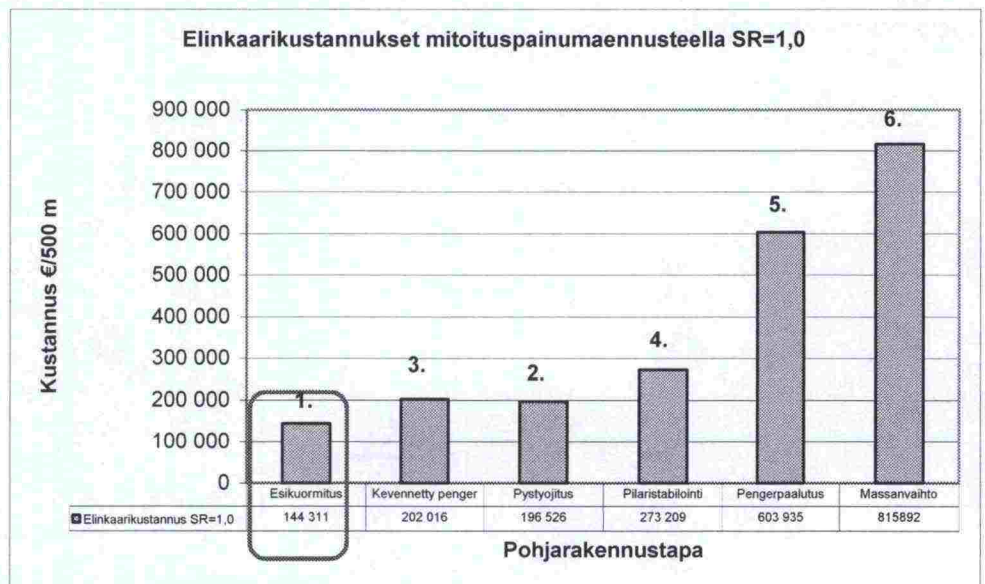
Siten ei voi täysin suoraan vetää täysin selvää johtopäätöstä, että maanvaraisen penkereen elinkaaren aikainen painumatilanne olisi selvästi parempi kuin kevennetyn penkereen elinkaaren aikainen painumatilanne. Kuva 30 osoittaa kuitenkin sen, että rakenteilla on elinkaariensa aikana on melkoiset painumaerot. Esimerkin mukaan saattaa siis käydä niin, että mitä aikaisemmin korjataan sen paremmassa kunnossa rakenne saattaa keskimäärin olla, mutta toisaalta mitä aikaisemmin korjaukseen ryhdytään sitä suuremmiksi rakenteen elinkaarikustannukset muodostuvat rahan diskonttausmenettelyn takia. Elinkaarilaskelmat eivät epätarkkuudessaan ota huomioon korjausajanhetkien välillä vallitsevia rakenteiden kunnossa olevia eroja, jos näistä eroista ei aiheudu lisäkustannuksia tai näitä kustannuksia ei voida määrittää. Elinkaarikustannusten laskemisen lisäksi olisi järkevää ainakin niissä tapauksissa, joissa elinkaarikustannukset ovat liki yhtä suuret, verrata rakennevaihtoehtojen keskimääräistä kuntoa elinkaaren aikana ennen lopullisen valintapäätöksen tekemistä. Edellä esitetty vertailu voisi olla yksi tekijä pohjarakenteen valinnassa kustannusten lisäksi.

Tarkastellaan vielä tehtävän valintapäätöksen tuloksen muuttumista erilaisista näkökulmista. Ensimmäisessä vaiheessa valittavan pohjarakenteen valinta perustuu pelkästään pohjarakenteen investointikustannuksiin. Kuvassa 31 on esitetty pelkästään eri vaihtoehtojen investointikustannukset. Esikuormitetun rakenteen investointi on hyvin pieni, koska käytännössä pohjarakennetta ei tehdä ollenkaan, vaan varaudutaan korjaamaan rakenne myöhemmin. Tämä vastaisi tilannetta, että suunnitteluvaiheessa tehdään tietoisesti päätös rakenteesta, joka korjataan rakentamisen jälkeen painumatilanteen selvittyä. Tämä ei vastaa todellisuudessa hyvää suunnittelukäytäntöä, joten siinä mielessä tältä osin investointikustannusten vertaaminen ei ole oikein järkevää.



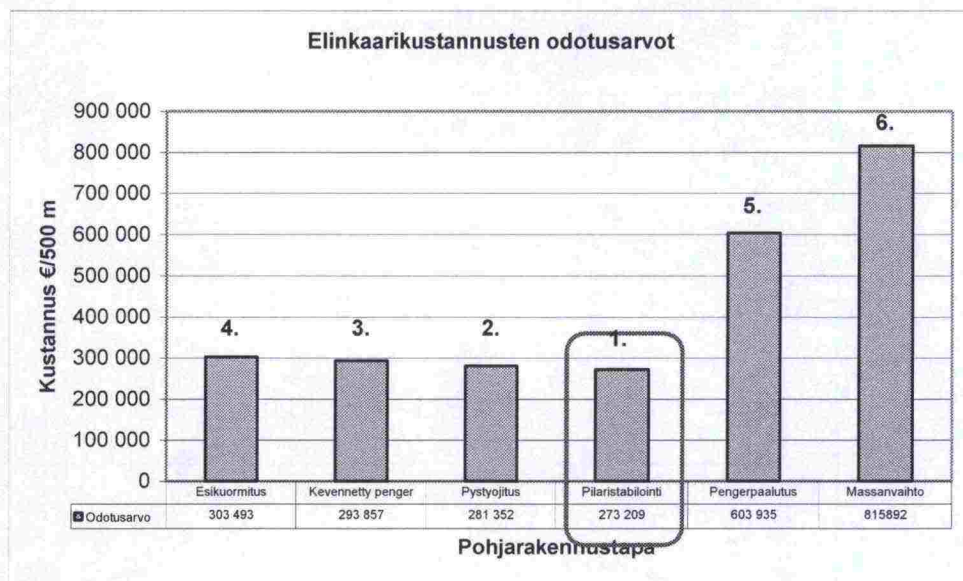
Kuva 31. Pohjarakennusvaihtoehtojen vertailu investointikustannusten perusteella.

Kuvasta 31 nähdään, että esikuormitus on halvin ja pelkästään investointi kustannuksia katsottaessa tämä tulisi valituksi vaihtoehdoksi. Kuvassa 32 on puolestaan kuvattu elinkaaren kustannukset mitoitustilanteessa rakenteen elinkaaren aikana, kun mitoitettu painumatilanne toteutuu eli $SR=1,0$. Tämä vastaa paremmin menetelmien todellisia kustannuksia.



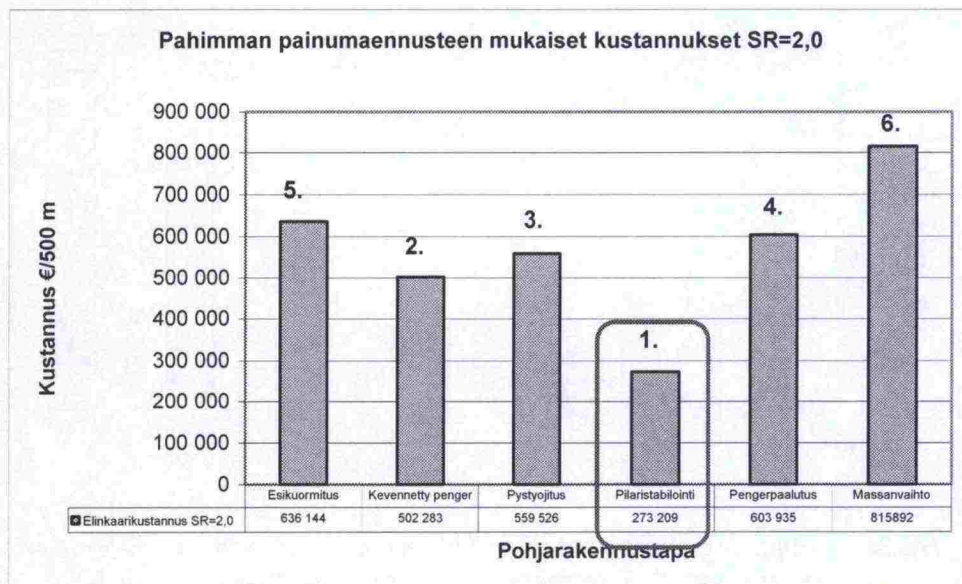
Kuva 32. Pohjarakennusvaihtoehtojen vertailu mitoituspainumaennusteen $SR=1,0$ eli normaalikäytännön mukaisesti.

Oletetulla painumamitoituksella esikuormitus on edelleen halvin menetelmä, toisaalta laadultaan se on hieman huonompi kuin muut vaihtoehdot. Tämä tarkasteluvaihtoehto ei ota huomioon eri vaihtoehtojen onnistumisvarmuutta, vaan pitää niitä yhtä luotettavina. Kuvassa 33 on taasen kaikki painumaennusteet ja niihin liittyvät todennäköisyydet huomioonottavat rakenteen elinkaarikustannusten odotusarvot.



Kuva 33. Pohjarakennusvaihtoehtojen vertailu rakenteen elinkaarikustannusten odotusarvojen perusteella.

Kuvasta nähdään, että pilaristabilointi on onnistumisvarmuutensa vuoksi noussut parhaimmaksi vaihtoehdoksi ja edellisissä vaihtoehdoissa valittu esikuormitus on jäänyt vertailussa vasta neljänneksi. Kuvassa 34 on esitetty vielä kaikkein pahimpien painumaennusteiden mukaan tehty elinkaarikustannusten vertailu. Tämä vastaa tilannetta, että halutaan minimoida elinkaa-
ren aikana syntyvät maksimikustannukset esimerkiksi myöhemmin syntyvien kustannusriskien rajoittamiseksi.



Kuva 34. Pohjarakennusvaihtoehtojen vertailu painumaennusteiden mukaisen elinkaarikustannusten maksimien perusteella.

Kuvasta 34 nähdään, että pilaristabilointi on edelleen edullisin vaihtoehto, mutta nyt muut riskialttiit vaihtoehdot ovat nousseet miltei pengerpaalutuksen tasolle. Lisäksi esikuormitus on vaihtoehtona jäänyt toiseksi viimeiseksi jopa pengerpaalutuksen jälkeen.

Edellä esitetyt kustannusvertailut selventävät kuvaa siitä, että lopullisen ratkaisun tekeminen elinkaarivertailun perusteella ei ole aina aivan helppoa. Lopullinen ratkaisu joudutaan tekemään vertaamalla eri ratkaisujen ominaisuuksia kuten rakentamisen kustannukset, elinkaaren kustannukset, rakenteen laatutaso painuman kannalta elinkaaren aikana sekä eri vaihtoehtojen riskien suuruus sekä riskien toteutumisen todennäköisyydet. Lopulliseen pohjarakennusmenetelmän valintaan voivat siten vaikuttaa paljon myös päättöksentekijän halu- ja kyky kantaa kustannusriskiä. Edellä esitetyn kustannusvertailun tulosta ei voi yleistää niin, että niistä voisi tehdä yleistä johtopäätöstä menetelmien edullisuudesta. Näin ei suinkaan ole, vaan laskentatulokset pätevät vain esimerkkikohteen mukaisilla laskentaoletuksilla.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Eri pohjarakennusvaihtoehtoihin sisältyvien riskien huomioiminen elinkaarikustannuslaskelmissa tuo uutta informaatiota päätöstilanteeseen ja saattaa muuttaa valintapäätöksen. Esimerkilaskelmien mukaan pelkkä investointilaskelmien huomioiminen pohjarakenteiden valintapäätöksissä ei optimoi koko elinkaaren kustannuksia.

Elinkaarikustannuksia laskettaessa on tärkeää ottaa huomioon myös muille osapuolille kuin tien pitäjälle tai urakoitsijalle aiheutuvat kustannukset. Koska tien pitäjänä on yleensä valtio tai kunta, joiden tehtävänä on yleisen edun ajaminen, sopii tällainen laajasti eri osapuolten kustannukset huomioon otta- va elinkaarilaskenta erinomaisesti näiden julkisten organisaatioiden taloudel- listen päätösten tueksi.

Eri rakennevaihtoehtojen kokonaistaloudellisuutta arvioidaan vertaamalla kustannuseroja elinkaaren aikana. Tärkeää elinkaarikustannusten lasken- nassa ei ehkä yllättäen olekaan todelliset elinkaaren kustannukset, vaan kustannuserot eri vaihtoehtojen välillä. Yleensä laskennasta jätetäänkin pois tekijät, jotka ovat kaikille vaihtoehtoil- le yhteisiä kustannuksia. Tämä helpot- taa laskentaa huomattavasti. Toisaalta laskentatulosten vertaamiseksi tulee tuntea tarkkaan laskentaan mukaan otetut tekijät.

Elinkaarilaskelmien perustana on rakenteen käyttäytymisen ennustamisen eli niin sanottujen elinikämallien tarkkuus. Pohjarakenteiden osalta elinikä- malleissa on vielä puutteita. Tämän selvityksen esimerkeissä on rakenteen käyttäytymistä kuvattu sivuttaiskaltevuuden ja rakenteen kokonaispainuman avulla, joiden perusteella on määritetty rakenteen korjaustoimenpiteet ja - ajanhetket. Laskennassa käytetyt raja-arvot vastaavat nykyisin ST-urakoissa käytettäviä tuotevaatimuksia ja pohjarakenteiden suunnitteluperusteiden mukaisia ohjearvoja.

Esimerkit osoittivat, että pelkkien investointikustannusten tuijottaminen saat- taa aiheuttaa suuria korjauskustannuksia myöhemmin, mikä ei ole tienpitä- jän kannalta useinkaan järkevää. Laskelmien vertailut osoittivat myös sel- västi kuinka valittu ratkaisu muuttui sen perusteella, minkälaista kriteeriä pohjarakenteen valinnassa käytettiin. Riskinottoa karttava päätöksentekijä saattaa päätyä erilaiseen lopputulokseen kuin riskin kannalta neutraali pää- töksentekijä. Elinkaarikustannusten lisäksi päätöstä voidaan lisäksi tarkastel- la rakenteen elinkaaren mukaisen painuman avulla, mikäli elinkaarikustan- nukset ovat miltei yhtä suuret.

Elinkaarilaskentaoletusten tunteminen on vähintään yhtä tärkeää kuin varsi- naisten laskentatulosten vertaaminen, sillä tehdyillä valinnoilla vaikutetaan huomattavasti saataviin laskentatuloksiin. Elinkaarilaskennassa käytettävät laskentaparametrit ovat osin mitattavissa olevia tekijöitä osin hallinnollisia päätöksiä. Tällaisia asioita ovat muun muassa laskentakorko, sekä tarkaste- luajanjakson pituus. Näiden tekijöiden järkevää vaihtelualuetta voidaan arvi- oida faktojen pohjalta. Edellä mainittujen asioiden käsittelyn yhtenäistäminen on yksi tärkeimpiä tekijöitä kun halutaan kehittää elinkaarikustannuslaskenta osaksi urakoiden tarjous- ja laskentatoimintaa. Vain näin voidaan varmistaa laskelmien vertailukelpoisuus keskenään.

Painuman kokonaisarvoa voidaan käyttää korjaustarpeen arviointiin, sillä se korreloi painumaerojen ja pituuskaltevuusmuutosten kanssa, jotka aiheutu- vat pohjasuhteiden vaihtelusta ja eri pohjarakennustapojen liittymiskohtien

erilaisista painumakäyttäytymisistä. Sallittujen painumaerojen ja pituuskaltevuuden muutoksien raja-arvot perustuvat todellisiin haittoihin, kuten ajomukavuuden, turvallisuuden sekä rakenteen toimivuuden heikkenemiseen painuman seurauksena. Pituuskaltevuuden ja painumaerojen arvioiminen on kuitenkin hankalampaa kuin kokonaispainuman arvioiminen. Tien sivukaltevuuden muutokseen perustuva korjaustarpeen arviointia ei yleensä ole järkevää kuin lyhyellä aikavälillä, sillä sivukaltevuuden korjaustarve poistuu yleensä päällysteen normaalista kulumisesta aiheutuvien päällystyskertojen yhteydessä ilman merkittäviä lisäkustannuksia.

Laskelmien vertailtavuuden parantamiseksi tien käyttäjän kustannusten laskentatapoja tulisi selvittää lisää ja tarjouspyyntöihin tulisi liittää selvät ohjeet näiden laskemisesta. Esimerkeissä tienkäyttäjän kustannuksia on arvioitu edellisten tutkimusten yhteydessä kerättyjen tietojen avulla. Tien käyttäjän kustannusten määrittämisessä on kuitenkin vielä melkoisesti epävarmuuskijöitä. Edellä mainittujen kustannusten mukaan ottaminen tarkasteluun vaikeuttaa elinkaarikustannuslaskelmien tekemistä jonkin verran, mutta toisaalta ne ovat välttämättömiä. Tienkäyttäjän kustannusten tai niiden laskentaperusteiden määrittäminen tapauskohtaisesti on vaativa tehtävä, joka jää tilaajan tehtäväksi. Urakoitsijalle tätä arviointia ei voida luovuttaa, koska urakoitsija ei kuitenkaan näitä kustannuksia joudu maksamaan ja urakoitsijan kannalta näiden kustannusten laskennallinen minimointi olisi edullista tarjoushinta määritettäessä. Tien käyttäjän kustannukset jäivät esimerkeissä suhteellisen pieniksi kokonaiskustannuksiin verrattuna, mutta tämä ei välttämättä tarkoita että näin kävisi kaikissa tilanteissa. Toisissa olosuhteissa nämä kustannuserot saattaisivat olla päätöksen kannalta ratkaiseva tekijä.

Painumariskien huomioon ottaminen elinkaarikustannuslaskennassa tuo uutta informaatiota päätöksenteon tueksi ja lisää siten tehtyjen päätösten luotettavuutta. Laskelmat osoittavat selkeästi millaisia seurauksia ja kustannusriskejä tiettyyn valintaan sisältyy, vaikka riskinarviointiin liittyvä parametritietous on tällä hetkellä vielä melko vähäistä.

Huolimatta elinkaarikustannusten laskennassa olevista epätarkkuuksista, laskentatulokset pyrkivät ottamaan huomioon elinkaaren kustannuksia monesta näkökulmasta ja siten ne ovat päätöstilanteessa suositeltavia, vaikka laskennassa joitain puutteita esiintyykin. Lisäksi haluttaessa voidaan tehdä herkkyystarkasteluja esimerkiksi jäännösarvojen tai laskentakoron tai muiden epävarmojen tekijöiden osalta, jolloin saadaan arvioitua näiden epävarmojen tekijöiden vaikutuksia laskentatuloksiin.

Selvityksen esimerkissä on vertailtu eri pohjarakennusmenetelmiä keskenään. Käytännön kohteissa käytetään usein yhtäaikaan useampia menetelmiä. Näissä tapauksissa vertailu tehdään tarkasteltavan tienosan rakentamisessa käytettävien pohjarakennustapojen yhdistelmien ja niiden elinkaarikustannusten välillä. Vertailussa täytyy muistaa, että elinkaarilaskelmat ovat tapaussidonnaisia ja niistä saatuja tuloksia ei voida yleensä suoraan soveltaa toiseen kohteeseen.

7 KIRJALLISUUSLUETTELO

- 1 Duncan Michael. Factors of Safety and Reliability in Geotechnical Engineering. Journal of Geotechnical Engineering and Environmental Engineering April 2000. s. 307-316.
- 2 Eskola, P., Mroueh U-M. ja Lehmus E. Infra-alan elinkaaritarkastelut: Kirjallisuuskatsaus. VTT. 15.10.2002. 34 s. + liitteet 1 s.
- 3 Helenelund, K.V., Leinonen L., Sneek T. Pohjarakennus RIL 95. Luku 3. Maamekaniikan perusteet. Helsinki 1974.s. 57-100. ISBN 951-758-003-7.
- 4 Hertz, Thomas. Risk Analysis and its applications. The Pitman Press Ltd. Bath, Avon 1983. ISBN 0471101451. 323 s.
- 5 Honko, Jaakko. Investointien suunnittelu ja tarkkailu. WSOY 1979, Porvoo. Viides painos. ISBN 951-0-09296-7. 263s.
- 6 Jokela, Pekka. Elinkaarimalli. Tiehallinnon hankintastrategia, osaraportti. Tiehallinnon selvityksiä 54/2002. Edita Prima Oy, Helsinki, 2002. ISBN 951-726-958-7. TIEH 3200786. 48s. + liitteet 23s.
- 7 Kalliokoski, Ari. Tierakenteen elinkaarianalyysi. Diplomityö. Oulun yliopisto 1995. 105 s. + liitteet 10 s.
- 8 Kankainen J. & Junnonen J-M. Rakennuttaminen. Tammer-Paino Oy. Tampere 2001. ISBN 951-682-631-8. s.101.
- 9 Lee I. K., White W. & Ingles O.G. Geotechnical Engineering. Pitman Publishing Inc. Massachusetts. 1983. ISBN 0-273-01756-X. 508 s.
- 10 Peltonen T. & Kiiras J. Rakennuttajan riskit eri urakkamuodoissa. Suomen toimitila- ja rakennuttajaliitto RAKLI ry ja Rakennustieto Oy. Gummerus Kirjapaino Oy, Saarijärvi 1998. ISBN 951-682-512-5. 114 s. + 1 liite.
- 11 Petäjä Sami, Spoof Harri. Päälysrakenteen elinkaarikustannusanalyysi. TPPT 20 Menetelmäkuvaus. Espoo 20.12.2001. 43 s. + liitteet 4s.
- 12 RIL 157-1 Geomekaniikka I. Mäkinen Reino, Lojander Matti. Luku 5. Maan ja kallion geotekninen kuvaus. Helsinki 1985. s. 91-146. ISBN 951-758-086-X. s.187-219.
- 13 RIL 157-2 Geomekaniikka II. Slunga Eero, Autio Jorma. Luku 14. Maa- ja kallioliuskien vakavuus. Helsinki 1990. s. 91-146. ISBN 951-758-213-7.
- 14 RIL 216-2001, Rakenteiden elinkaaritekniikka. Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL r.y. Helsinki 2001. 301s.
- 15 Sund, Even k. Life-Cycle Cost Of Road Pavements. Department of Road and Railway Engineering. The Norwegian University of Science and Technology NTNU. 1996.
- 16 Tammirinne, Markku. Tierakenteen suunnittelu ja mitoitus: TPPT-suunnittelujärjestelmän kuvaus. Tiehallinnon selvityksiä 7/2020. Edita Prima Oy, Helsinki, 2002. ISBN 951-726-868-8. TIEH 3200741. 204 s.
- 17 Tiehallinnon julkaisuja. Tienpidon hankintastrategia. Edita Prima Oy. Helsinki 2003. TIEH 1000061-03. s.37.

- 18 Tiehallinnon ohjeita. Teiden pohjarakenteiden suunnitteluperusteet. Oy Edita Ab, Helsinki, 2001. ISBN 951-726-743-6. TIEH 2100002-01. 59 s. + liitteet 53 s.
- 19 Tiehallinnon ohjeita. Tien perustamistavan valinta. Oy Edita Ab, Helsinki, 2003. ISBN 951-803-060-X. TIEH 2100019-03. 49 s.+ liitteet 11s.
- 20 Tiehallinnon sisäisiä julkaisuja 19/2002. Pohjarakentamisen kustannustietoja. Oy Edita Ab, Helsinki 2002. ISBN 1457-991X, TIEH 4000330.
- 21 Tieinvestoinnit ja ylläpito & hoito: markkinaselvitys. Tiehallinnon sisäisiä julkaisuja 10/2003. ISSN 1458-1561. TIEH 400367-v. 15 s.
- 22 Tielaitoksen Geokeskus geotekniikka ja geologia julkaisu. Tierakenteiden geotekniset laskelmat. Oy Edita Ab Helsinki 1996. ISBN 951-726-212-4. 31s.
- 23 Tielaitoksen selvityksiä 14/2000. Tietyömaiden liikennehaittojen arviointi. Oy Edita Ab, Helsinki, 2000. ISBN 951-726-628-6. TIEL 3200603. 63 s. + liitteet 11 s.
- 24 Tielaitoksen selvityksiä 28/1998. Teiden pehmeikkötutkimukset. Edita Oy Helsinki 1998. ISBN 951-726-447-X. TIEL 3200520. 90 s.
- 25 Tieliikelaitoksen intranet:
[/netta.tieliikelaitos.fi/liikelaitoksen_palvelut/liikennevaylat/hoito/](http://netta.tieliikelaitos.fi/liikelaitoksen_palvelut/liikennevaylat/hoito/) 9.9.2003
- 26 Torbjörn Edstam. Erfarenhetsbank för kalk-cementpelare. Rapport I. Svensk Djubstabilisering. Swedish Deep Stabilization Research Centre. Linköping 1997. ISSN 1402-2036. s. 158.

8 LIITTEET

- Liite 1: Maaparametrien variaatiokertoimia kirjallisuudessa
- Liite 2: Painuman variaatiokertoimen määrittäminen kokoonpuristuvuusindeksin avulla
- Liite 3: Maanvaraisen penkereen elinkaarilaskelmat
- Liite 4: Kevennetyn penkereen elinkaarilaskelmat
- Liite 5: Pystyojitetun penkereen elinkaarilaskelmat

Maaparametrien variaatiokertoimia kirjallisuudessa

<i>Test</i>	<i>Reported CV(%)</i>	<i>Source</i>	<i>Recommended Standard</i>	<i>Remarks</i>
Absorption	25	1	25	
Air voids	16-30	4,16	20	
Angle of friction (sands)	5-15	2,3,20,21	10	
Angle of friction (clays)	12-56	2,20,21	—	Wide variation
Bitumen content	5-8	4,16	6	
CBR	17-58	1,4	25	
Cement content	13-30	4,5	20	
Clay content	9-70	1,2,14,15,22	25	
Cohesion (undrained)				
(clays)	20-50	2,20	30	
(sands)	25-30	2	30	
Compaction (OMC)	11-43	1,6,12	20,40	Lower value, clay soi higher value, sands & gravels
Compaction (MDD)	1-7	2,4,6,12,22	5	
Compressibility	18-73	2,15,21,22	30	
Consolidation coefficient	25-100	2,15,22	50	
Crushing value	8-14	1		
Density (apparent or true)	1-10	1,2,12,20,22	3	
Elastic modulus	2-42	17,18	30	
Elongation	18-33	1	25	
Flakiness	13-40	1,6	25	
Flow (bitumen)	11-15	4,16	15	
Grading (means)	9-31	1	25	
Grading (slopes)	19-37	1	30	On a Rosin-Rammler plot
Levels (e.g., pavement)	50-300	7,11	200	
Linear shrinkage	57-135	1,6	100	Refers to gravel & crushed rock; will be lower for soils
Liquid limit	2-48	2,4,10,12,14,15,20,22	10	
Los Angeles abrasion	31	1	30	Is gamma distributed
Moisture content	6-63	4,5,9,15,20,21,22	15	See remarks to "compaction, OMC"
Permeability	200-300	2	300	
Plastic limit	9-29	2,12,14,15,20	10	
Plasticity index	7-79	1,4,6,10,12,15,20	30,70	Lower value, clay soi higher value, sandy, gravelly soils
Sand content	1-43	2,4,5,8,10,15	20	
Sand equivalent	25	1	25	
Specific gravity	see Density			
Stability (bitumen)	13-19	4	20	
Standard Penetration Test	27-85	21,22	30	
Sulphate soundness	92	1	100	Is gamma distributed
Tensile strength	15-29	18	20	
Thickness (concrete pavement)	3-4	4	4	
Thickness (AC pavement)	7-16	4,13	15	
Thickness (stabilization work)	11-13	4,6	15	
Unconfined compressive strength	6-100	17,19,22	40	
Void ratio	13-42	2,4,15,21	25	

Kuva 35. Erilaisia maaparametrien variaatiokertoimia [9]

Painuman variaatiokertoimen määrittäminen kokoonpuristuvuusindeksin avulla

Yleinen variaatiokerroin määritellään kaavalla 20, joka saadaan kokoonpuristuvuusindeksin tapauksessa kaavan 21 muotoon. Ratkaistaan tästä kokoonpuristuvuusindeksin keskihajonta $sd(C_c)$ valitsemalla kokoonpuristuvuusindeksin variaatiokertoimeksi 30 % kaavan 22 mukaisesti.

$$CV = 100 \cdot \frac{s}{\bar{x}} \quad (20)$$

$$\Rightarrow CV(C_c) = 100 \cdot \frac{sd(C_c)}{\bar{C}_c} \quad (21)$$

$$\Leftrightarrow sd(C_c) = 0,3 \cdot \bar{C}_c \quad (22)$$

Penkereen painuma lasketaan kaavalla 23. Ottamalla huomioon yllä laskettu kokoonpuristuvuusindeksin keskihajonta saadaan painumalaskelmasta kaksi erilaista tulosta kaavojen 24 ja 25 mukaisesti.

$$S = \frac{C_c}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'}{\sigma'_0} \cdot h \quad (23)$$

$$S_{c1} = \frac{C_c + d(C_c)}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'}{\sigma'_0} \cdot h = 1,3 \cdot \frac{C_c}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'}{\sigma'_0} \cdot h = 1,3 \cdot S \quad (24)$$

$$S_{c2} = \frac{C_c - sd(C_c)}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'}{\sigma'_0} \cdot h = 0,7 \cdot \frac{C_c}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'}{\sigma'_0} \cdot h = 0,7 \cdot S \quad (25)$$

Painumaero saadaan kaavasta 26.

$$\Delta S_c = S_{c1} - S_{c2} = 1,3 \cdot S - 0,7 \cdot S = 0,6 \cdot S \quad (26)$$

Painuman keskihajonta saadaan kaavasta 27.

$$sd(S) = \sqrt{\Delta S_c^2} = \sqrt{(0,6 \cdot S)^2} = 0,6 \cdot S \quad (27)$$

Painuman variaatiokerroin saadaan kaavasta 28.

$$\Rightarrow CV(S) = 100 \cdot \frac{sd(S)}{S} = 100 \cdot \frac{0,6 \cdot S}{S} = 60 \quad (28)$$

Tulokseksi saatiin siis, että painuman variaatiokerroin on 60 %, kun Maanvaraisen penkereen elinkaarilaskelmat kokoonpuristuvuusindeksin variaatiokertoimeksi on valittu 30 %.

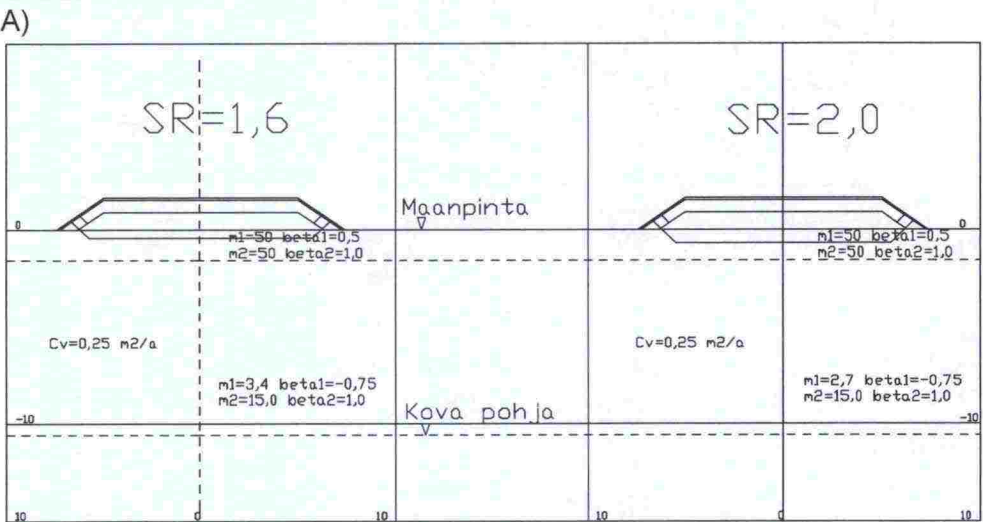
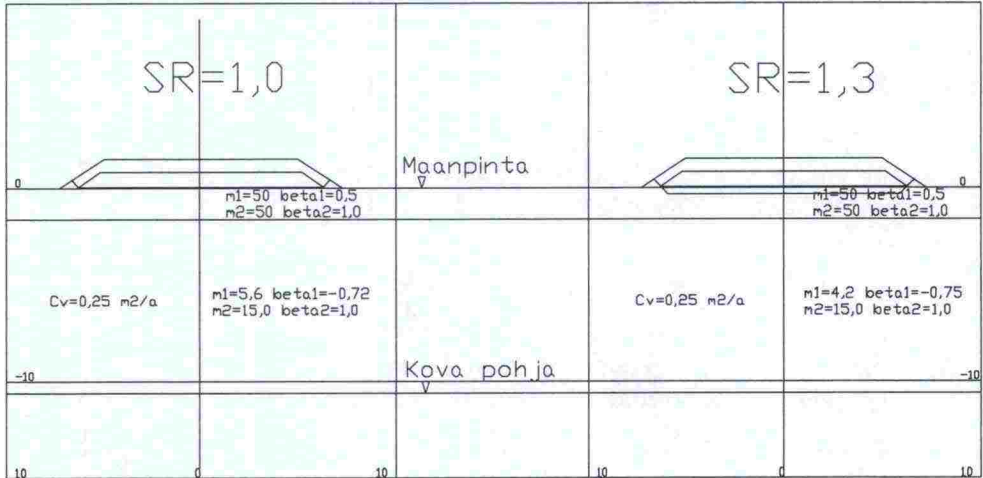
Maanvaraisen penkereen elinkaarilaskelmat

Korjausten ajoittuminen on katsottu painuma- ja sivukaltevuudenmuutostenusteista kuvat 11 ja 12. Taulukkoon 26 on koottu eri painumaennusteiden mukaiset korjausajankohdat.

Taulukko 26. Maanvaraisen penkereen elinkaarelle osuvien korjausten ajoittuminen.

	Sivukaltevuuskorjaukset	Painumakorjaus
Mitoitustilanne	[vuosi]	[vuosi]
SR=1,0	2,6	35
SR=1,3	1,4,9	18
SR=1,6	1,3,5,10	11
SR=2,0	1,2,4,6,(10)	7

Kuvissa36 A) JA B) on esitetty elinkaarien mukaiset korjausrakenteet sekä eri painumatilanteiden mitoituksessa käytetyt painumaparametrit.



B)
Kuva 36 Maanvaraisen penkereen korjausrakenteiden poikkileikkaukset mahdollisissa erilaisissa painumatilanteissa sekä mitoituksessa käytetyt painumaparametrit.

Taulukkoon 27 on koottu eri painumaennusteiden mukaiset kustannuslaskelmat. Yksittäisten painumaennusteiden mukaisia korjausmääriä ei ole tähän sisällytetty esityksen tiivistämiseksi. Päälylystämistä aiheutuvat korjauskustannukset sekä tien käyttäjän kustannukset ovat samat kuin kappaleessa 5.3.2 on esitetty. Rakenteen jäännösarvo vaihtelee rakenteeseen tulevan kevytsoran mukaan. Investointikustannukset ovat luonnollisesti kaikissa vaihtoehdoissa samat, koska perusinvestointi on tehty vain kerran tietyllä rakenteella, minkä jälkeen rakenteen painumaennuste ja sen mukaiset korjaustoimenpiteet ja niiden ajoittuminen vaihtelevat.

Taulukko 27. Maanvaraisen penkereen elinkaarien kustannukset kootusti.

Elinkaarikustannukset SR=1,0

Toimenpidevuosi	Toimenpide-/kustannus	Kustannus	Disk.tekijä	Disk. kustannus
0	Investointi	6 750	1,00	6 750
2	Korjaus 1	28 500	0,92	26 350
2	Korjaus 1, käyttäjän kust.	1 030	0,92	952
6	Korjaus 2	28 500	0,79	22 524
6	Korjaus 2, käyttäjän kust.	1 030	0,79	814
35	Korjaus 3	360 475	0,25	91 350
35	Korjaus 3, käyttäjän kust.	28000	0,25	7 096
50	Jäännösarvo	-81 900	0,141	-11 524

Yhteensä

144 311

Elinkaarikustannukset SR=1,3

Toimenpidevuosi	Toimenpide-/kustannus	Kustannus	Disk. tekijä	Disk. kustannus
0	Investointi	6 750	1,00	6 750
1	Korjaus 1	28 500	0,96	27 404
1	Korjaus 1, käyttäjän kust.	1 030	0,96	990
4	Korjaus 2	28 500	0,85	24 362
4	Korjaus 2, käyttäjän kust.	1 030	0,85	880
9	Korjaus 3	28 500	0,70	20 024
9	Korjaus 3, käyttäjän kust.	1 030	0,70	724
18	Korjaus 4	585 025	0,49	288 785
18	Korjaus 4, käyttäjän kust.	28000	0,494	13 822
50	Jäännösarvo	-171 990	0,141	-24 201

Yhteensä

359 539

Taulukko 28. Maanvaraisen penkereen elinkaarien kustannukset kootusti.

Elinkaarikustannukset SR=1,6

Toimen- pidevuosi	Toimenpide/ kustannus	Kustannus	Disk.tekijä	Disk. kustannus
0	Investointi	6 750	1,00	6 750
1	Korjaus 1	28 500	0,96	27 404
1	Korjaus 1, käyttä- jän kust.	1 030	0,96	990
3	Korjaus 2	28 500	0,89	25 336
3	Korjaus 2, käyttä- jän kust.	1 030	0,89	916
5	Korjaus 3	28 500	0,82	23 425
5	Korjaus 3, käyttä- jän kust.	1 030	0,82	847
10	Korjaus 4	28 500	0,68	19 254
10	Korjaus 4, käyttä- jän kust.	1 030	0,676	696
11	Korjaus 5	649 325	0,65	421 789
11	Korjaus 5, käyttä- jän kust.	28000	0,650	18 188
50	Jäännösarvo	-212 940	0,141	-29 963

Yhteensä

515 631

**Elinkaarikustannukset
SR=2,0**

Toimen- pidevuosi	Toimenpide/ kustannus	Kustannus	Disk.tekijä	Disk. kustannus
0	Investointi	6 750	1,00	6 750
1	Korjaus 1	28 500	0,96	27 404
1	Korjaus 1, käyttä- jän kust.	1 030	0,96	990
2	Korjaus 2	28 500	0,92	26 350
2	Korjaus 2, käyttä- jän kust.	1 030	0,92	952
4	Korjaus 3	28 500	0,85	24 362
4	Korjaus 3, käyttä- jän kust.	1 030	0,85	880
6	Korjaus 4	28 500	0,79	22 524
6	Korjaus 4, käyttä- jän kust.	1 030	0,790	814
7	Korjaus 5	709 525	0,76	539 181
7	Korjaus 5, käyttä- jän kust.	28000	0,760	21 278
50	Jäännösarvo	-251 160	0,141	-35 341

Yhteensä

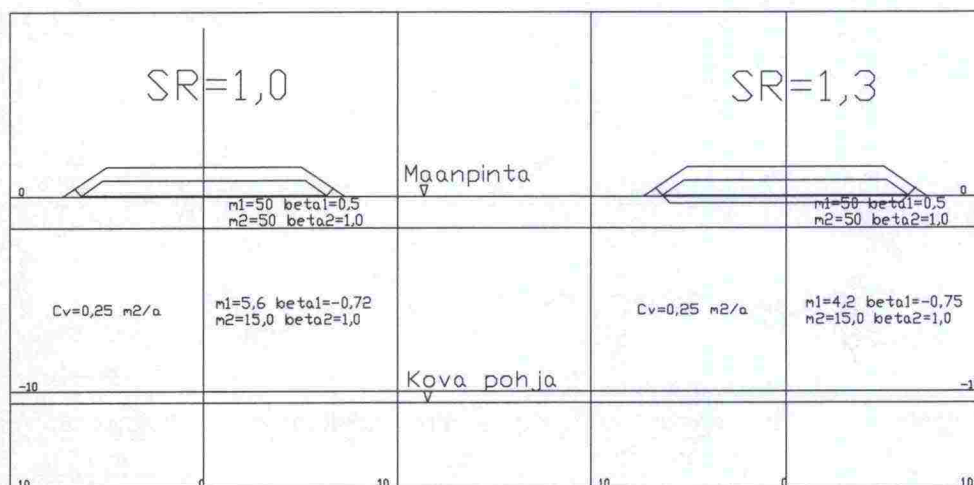
636 144

Kevennetyn penkereen elinkaarilaskelmat

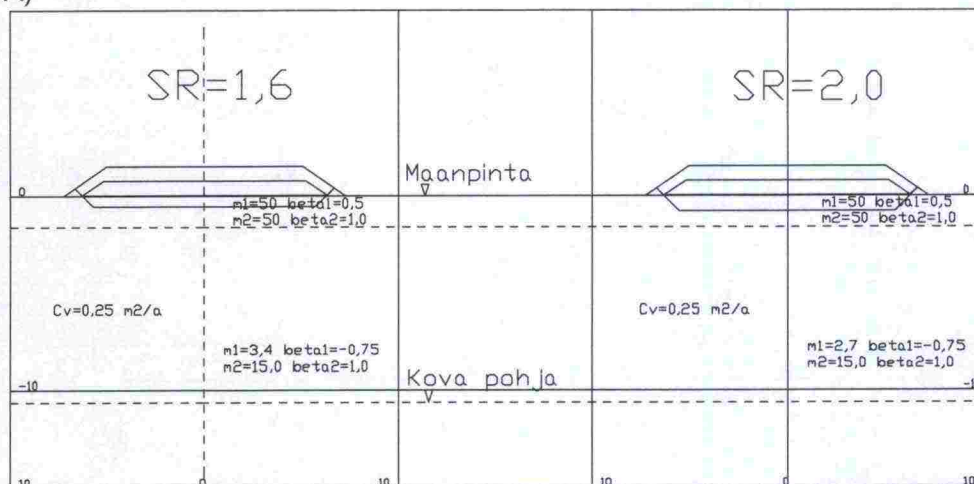
Korjausten ajoittuminen on katsottu painuma- ja sivukaltevuudenmuutosennusteista kuvat 17 ja 18. Taulukkoon 29 on koottu eri painumaennusteiden mukaiset korjausajankohdat. Taulukoissa 30 ja 31 on esitetty eri painumaennusteiden mukaiset elinkaarikustannukset.

Taulukko 29. Maanvaraisen penkereen elinkaarelle osuvien korjausten ajoittuminen.

	Sivukaltevuuskorjaukset	Painumakorjaus
Mitoitustilanne	[vuosi]	[vuosi]
SR=1,0	1,7	-
SR=1,3	1,3,7	47
SR=1,6	1,2,6	23
SR=2,0	1,2,3,7	11



A)



B)

Kuva 37. Maanvaraisen penkereen korjausrakenteiden poikkileikkaukset mahdollisissa erilaisissa painumatilanteissa, sekä mitoituksessa käytetyt painumaparametrit.

Taulukko 30. Kevennetyn penkereen eri elinkaarien kustannukset kootusti.

Elinkaarikustannukset SR=1,0

Toimen- pidevuosi	Toimenpide/ kustannus	Kustannus	Disk.tekijä	Disk. kustannus
0	Investointi	167 700	1,00	167 700
1	Korjaus 1	28 500	0,96	27 404
1	Korjaus 1, käyt- täjän kust.	1 030	0,96	990
7	Korjaus 2	28 500	0,76	21 658
7	Korjaus 2, käyt- täjän kust.	1 030	0,76	783
50	Jäännösarvo	-117 390	0,141	-16 518

Yhteensä

202 016

Elinkaarikustannukset SR=1,3

Toimen- pidevuosi	Toimenpide/ kustannus	Kustannus	Disk.tekijä	Disk. kustannus
0	Investointi	167 700	1,00	167 700
1	Korjaus 1	28 500	0,96	27 404
1	Korjaus 1, käyt- täjän kust.	1 030	0,96	990
3	Korjaus 2	28 500	0,89	25 336
3	Korjaus 2, käyt- täjän kust.	1 030	0,89	916
7	Korjaus 3	28 500	0,76	21 658
7	Korjaus 3, käyt- täjän kust.	1 030	0,76	783
47	Korjaus 4	503 625	0,16	79 715
47	Korjaus 4, käyt- täjän kust.	28000	0,158	4 432
50	Jäännösarvo	-182 910	0,141	-25 738

Yhteensä

303 196

Elinkaarikustannukset SR=1,6

Toimen- pidevuosi	Toimenpide/ kustannus	Kustannus	Disk.tekijä	Disk. kustannus
0	Investointi	167 700	1,00	167 700
1	Korjaus 1	28 500	0,96	27 404
1	Korjaus 1, käyt- täjän kust.	1 030	0,96	990
2	Korjaus 2	28 500	0,92	26 350
2	Korjaus 2, käyt- täjän kust.	1 030	0,92	952
6	Korjaus 3	28 500	0,79	22 524
6	Korjaus 3, käyt- täjän kust.	1 030	0,79	814
23	Korjaus 5	563 825	0,41	228 759
23	Korjaus 5, käyt- täjän kust.	28000	0,406	11 360
50	Jäännösarvo	-212 940	0,141	-29 963

Yhteensä

456 890

Taulukko 31. Kevennetyn penkereen eri elinkaarien kustannukset kootusti.

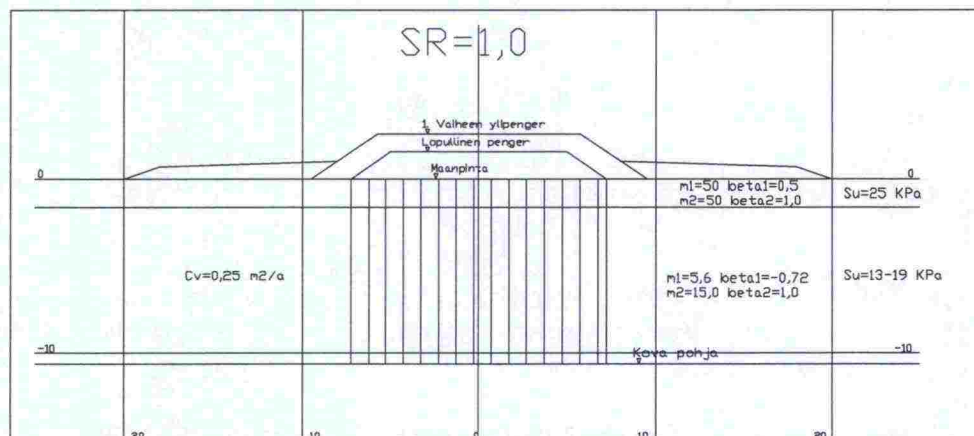
Elinkaarikustannukset**SR=2,0**

Toimen- pidevuosi	Toimenpide/ kustannus	Kustannus	Disk.tekijä	Disk. kus- tannus
0	Investointi	167 700	1,00	167 700
1	Korjaus 1	28 500	0,96	27 404
1	Korjaus 1, käyt- täjän kust.	1 030	0,96	990
2	Korjaus 2	28 500	0,92	26 350
2	Korjaus 2, käyt- täjän kust.	1 030	0,92	952
3	Korjaus 3	28 500	0,89	25 336
3	Korjaus 3, käyt- täjän kust.	1 030	0,89	916
7	Korjaus 4	28 500	0,76	21 658
7	Korjaus 4, käyt- täjän kust.	1 030	0,76	783
23	Korjaus 5	624 575	0,41	253 407
23	Korjaus 5, käyt- täjän kust.	28000	0,406	11 360
50	Jäännösarvo	-245 700	0,141	-34 573

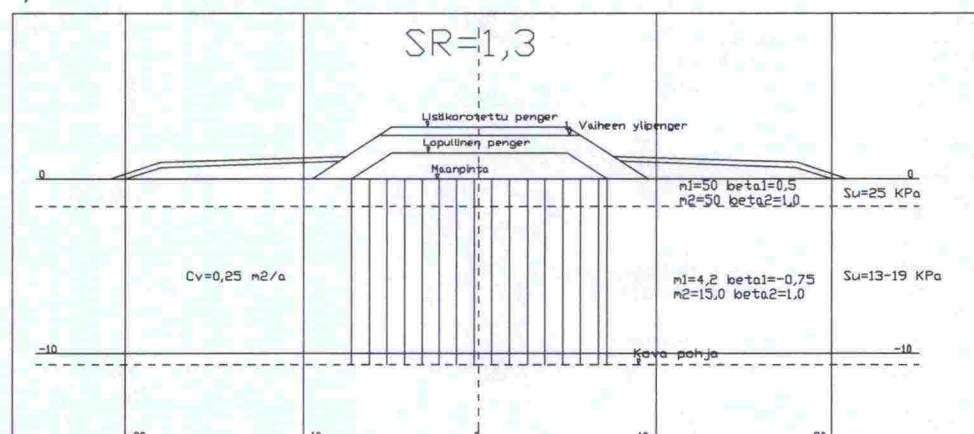
Yhteensä**502 283**

Pystyojitetun penkereen elinkaarilaskelmat

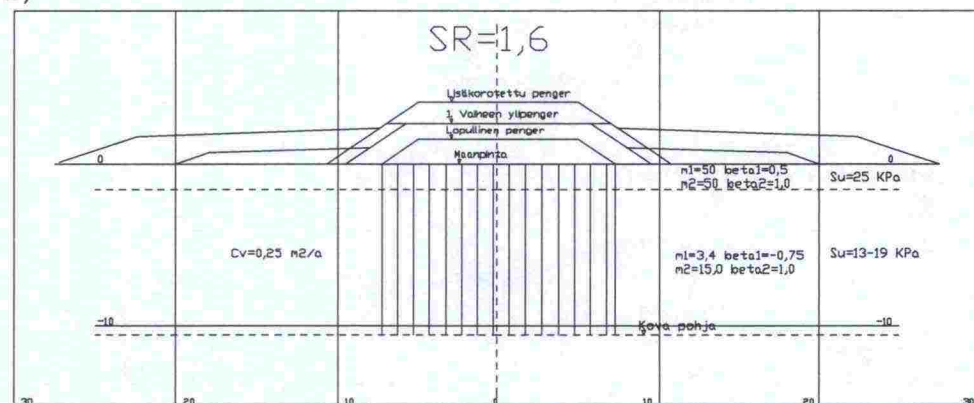
Pystyojitetussa vaihtoehdossa painumakorjaukset suoritetaan jo rakentamisen aikana. Korjausrakenteiden poikkileikkaukset on esitetty kuvassa 38. Painumaennusteiden mukaiset elinkaarikustannukset on esitetty taulukossa 32.



A)

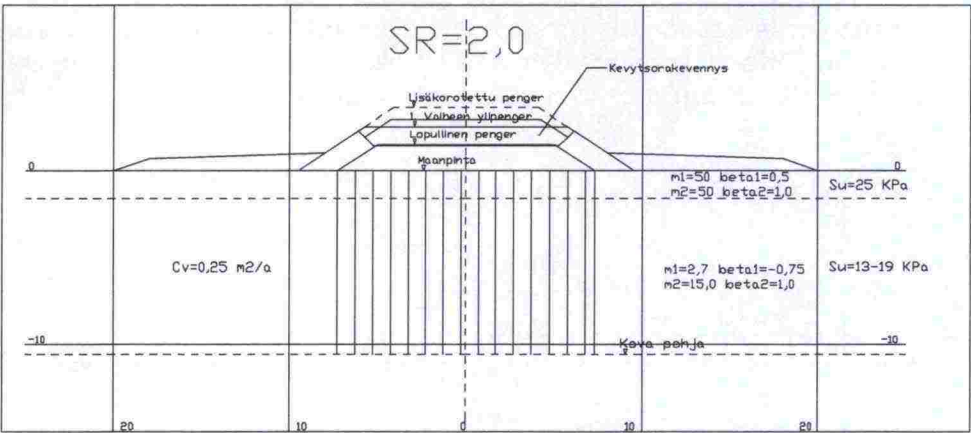


B)



C)

Kuva 38. Pystyojitetun penkereen korjausrakenteiden poikkileikkaukset mahdollisissa erilaisissa painumatilanteissa, sekä mitoituksessa käytetyt painumaparametrit.



Kuva 39. Maanvaraisen penkereen korjausrakenteiden poikkileikkaukset mahdollisissa erilaisissa painumatilanteissa. sekä mitoituksessa käytetyt painumaparametrit.

Taulukko 32. Pystyöjitetun penkereen eri elinkaarien kustannukset kootusti.

Elinkaarikustannukset

SR=1,0

Toimenpidevuosi	Toimenpide-/kustannus	Kustannus	Disk.tekijä	Disk. kustannus
-1,5	Investointi	185 298	1,061	196526
50	Jäännösarvo	0	0,141	0

Yhteensä **196526**

Elinkaarikustannukset

SR=1,3

Toimenpidevuosi	Toimenpide-/kustannus	Kustannus	Disk.tekijä	Disk. kustannus
-1,5	Investointi	185 298	1,061	196526
0	Korjaus 1	38 700	1,000	38700
0	Korjaus1, käyt-täjäkust.	0	1,000	0
50	Jäännösarvo	0	0,141	0

Yhteensä **235226**

Elinkaarikustannukset

SR=1,6

Toimenpidevuosi	Toimenpide-/kustannus	Kustannus	Disk.tekijä	Disk. kustannus
-1,5	Investointi	185 298	1,061	196526
0	Korjaus 1	164 950	1,000	164950
0	Korjaus1, käyt-täjäkust.	0	1,000	0
50	Jäännösarvo	0	0,141	0

Yhteensä **361476**

Taulukko 33. Pystyojitetun penkereen eri elinkaarien kustannukset kootusti.

Elinkaarikustannukset

SR=2,0

Toimen- pidevuosi	Toimenpide/- kustannus	Kustannus	Disk.tekijä	Disk. kus- tannus
-1,5	Investointi	185 298	1,061	196526
0	Korjaus 1	363 000	1,000	363000
0	Korjaus1, käyttäjä- kust.	0	1,000	0
50	Jäännösarvo	0	0,141	0

Yhteensä

559526

ISSN 1457-9871
ISBN 951-803-251-3
TIEH 3200870